

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Ekologie a ochrana prostředí
Studijní obor: Ochrana životního prostředí



Jana, Hernová

Využití družicových dat programu Copernicus pro environmentální výzkum s případovou studií zaměřenou na vyhodnocení REP rekultivovaných ploch v okolí jezera Medard

Using satellite data of the Copernicus program for environmental research with a case study focused on assessment of REP reclaimed land in the neighbourhood of the lake Medard

Bakalářská práce

Vedoucí závěrečné práce/Školitel: Ing. Luboš Matějíček, Ph.D.

Praha, 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 11.08.2017

Podpis

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Luboši Matějčíkovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce. Mé poděkování patří též paní Mgr. Veronice Kopačkové, Ph.D. za spolupráci při získávání údajů pro výzkumnou část práce a atmosférickou korekci dat Sentinel-2.

Využití družicových dat programu Copernicus pro environmentální výzkum s případovou studií zaměřenou na vyhodnocení REP rekultivovaných ploch v okolí jezera Medard

Abstrakt

Práce je rozdělena do dvou částí na rešeršní část a případovou studii.

První část je zaměřena na popis družic Sentinel programu Copernicus a jejich využití pro environmentální výzkum. Práce je rozšířena o příklady studií a projektů, které čerpají a využívají družicových dat z řad Sentinelů s užším zaměřením na Sentinel-2.

Druhá část práce se zabývá využitím vegetačního indexu REP ze Sentinelu-2, pro hodnocení vegetace na výsypkách a rekultivovaných plochách a vhodností prostorového rozlišení REP z dat Sentinelu-2. Jako zájmové území byla zvolena oblast jezera Medard.

Klíčová slova: družicová data, Copernicus, environmentální výzkum, REP, Medard

Using satellite data of the Copernicus program for environmental research with a case study focused on assessment of REP reclaimed land in the neighbourhood of the lake Medard

Abstract

The thesis is divided into two parts on theoretical part and case study.

The first deals is focused on description satellites of the Copernicus program and using for environmental research. The work is supplemented with examples of studies and projects that use satellite data of Sentinel with a focus on Sentinel-2.

The second part deals with the use of the vegetation index REP of Sentinel-2 for the evaluation of vegetation in the landscape recultivation and evaluation of spatial resolution REP Sentinel-2. The area of interest is in the neighbourhood of the lake Medard.

Keywords: satellite data, Copernicus, environmental research, REP, Medard

Obsah:

1	Rešeršní část	8
1.1	Úvod a cíl práce	8
1.2	Dálkový průzkum Země	8
1.3	Program Copernicus	9
1.4	Mise Sentinel-1	10
1.4.1	Radarový senzor SAR	10
1.4.2	Využití dat družic Sentinel-1	11
1.4.2.1	Monitorování zemětřesení a rizika sesuvu půd	11
1.4.2.2	Ropné havárie	13
1.4.2.3	Monitorování zón mořského ledu a arktického prostředí	13
1.5	Mise Sentinel-2	14
1.5.1	Spektrální pásma MSI	15
1.5.2	Využití dat družic Sentinel-2	16
1.5.2.1	Aplikace v precizním zemědělství	16
1.5.2.2	Monitorování obsahu železa vázaného na minerály v půdě	17
1.5.2.3	Hodnocení zdravotního stavu jehličnatých lesů	18
1.5.2.4	Hodnocení zdravotního stavu listnatých lesů	19
1.5.2.5	Monitoring suchých oblastí a ploch spálenými požáry	20
1.5.2.6	Monitoring vod a mořského prostředí	23
1.6	Mise Sentinel-3	26
1.6.1	OLCI	26
1.6.1.1	Využití OLCI	27
1.6.2	SLSTR	28
1.6.2.1	Využití SLSTR	29
1.6.3	SRAL a MWR	30
1.7	Mise Sentinel-4	30
1.8	Mise Sentinel-5 Precursor	31
1.9	Mise Sentinel-5	31
2	Případová studie	33
2.1	Úvod do problematiky	33
2.2	Spektrální projev vegetace	33
2.3	Spektrální chování dalších prvků krajiny	35
2.4	REP (red edge position)	35
2.5	Zájmová oblast jezero Medard	38
2.6	Metoda zpracování dat	39

2.6.1	Atmosférická korekce	39
2.6.2	Metodika výpočtu.....	40
2.6.3	Validace dat	41
2.7	Diskuze	43
2.7.1	Prostorové rozlišení.....	43
2.7.2	Zhodnocení map REP ze Sentinelu-2 zájmové oblasti.....	44
2.8	Závěr	47
2.9	Seznam literatury	48
2.10	Internetové zdroje.....	51
2.11	Seznam obrázků a tabulek.....	51
2.12	Přílohy.....	53

1 Rešeršní část

1.1 Úvod a cíl práce

Žijeme ve světě, který je čím dál víc ovlivňován antropogenní činností. Musíme se vypořádat s dopady globálního oteplování, přelidnění, vyčerpávání přírodních zdrojů a dalšími problémy, které mají negativní dopad na životní prostředí. Čelíme také přírodním katastrofám jako je zemětřesení, sesuvy půd, povodně a další, se kterými se potýkáme dnes a denně. Dálkový průzkum Země, dokáže do určité míry některé děje předpovídat, analyzovat množství škod, nebo nám pomůže se na daný problém připravit. Na své si zde přijdou i vědci a výzkumné instituce, data pomohou monitorovat stav životního prostředí a odpovědět na dosud nezodpovězené otázky. Za tímto cílem byl vytvořen program Copernicus pod správou Evropské vesmírné agentury ESA.

Práce je cílena na popis a zaměření družic Sentinel programu Copernicus. V následujících kapitolách budou jednotlivě rozebrány řady 1 - 5 družic Sentinel a budou popsány možnosti aplikací v environmetálních vědách s příklady případových studií. Práce je zaměřena zejména na Sentinel-2, kde v případové studii bude demonstrováno jeho praktické využití v případě hodnocení stavu vegetace vegetačním indexem REP na výsypkách a rekultivovaných plochách se zaměřením na oblast jezera Medard.

1.2 Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země (DPZ) je způsob získávání dat o objektech na zemském povrchu bez přímého kontaktu s ním. Nejčastější nosiče s měřicí aparaturou jsou družice, letadla, balóny, vrtulníky ale třeba také i drony a jiné bezpilotní přístroje. Na nich jsou umístěny speciální měřicí přístroje - radiometry, díky nimž je možné mapovat a získávat informace o povrchu naší Země.

Na zemský povrch dopadá elektromagnetické záření ze Slunce. Na interakci se zářením reagují každé objekty jinak, liší se chemickými a fyzikálními vlastnostmi, mají odlišný povrch a také záleží na úhlu dopadu. Některé záření se pohltí, jiné se rozptýlí nebo se záření od povrchu odrazí. Senzory pak měří intenzitu odraženého či emitovaného záření. Nelze opomenout

metodu využívající radary, které na rozdíl od optických metod generují vlastní záření o delší vlnové délce v mikrovlnné části spektra.

Výhodou DPZ je získání dat v poměrně krátké době dané plochy jako celku, ne jen samotných bodů, jako by tomu bylo v případě pozemního měření. Sběr dat se opakuje v intervalech, a proto je možné dlouhodobě pozorovat změny či vyvodit jaký je trend pozorovaného jevu. Dokážeme získat informace na špatně dostupných místech a také o procesech, které bychom pouhým okem a pozorováním v terénu nezjistili. Lidské oko dokáže vnímat záření pouze ve viditelném spektru. Díky nejmodernějším technologiím je DPZ možné získat informace z celého elektromagnetického spektra od ultrafialového do mikrovlnného záření. Dokážeme například určit směr mořských proudů, teplotu budov či pozorovat vývoj oblačných systémů. DPZ má široké využití jak v humanitních, tak v přírodních vědách. Aplikovat ho můžeme třeba v geologii, geografii, archeologii a třeba právě i v ekologii a ochraně životního prostředí (James B. Campbell, 2002).

1.3 Program Copernicus

Program Copernicus dříve pod zkratkou GMES - Global Monitoring for Environment and Security vznikl z rozhodnutí Evropské komise na summitu Evropské Unie v Göteborgu v roce 2001. Doposud se používala data z mimoevropských programů, která mnohdy neměla potřebné parametry, či nebyla dostupná vůbec. Proto bylo cílem vytvořit evropský systém DPZ, který by poskytoval globální monitoring životního prostředí a zajišťoval civilní bezpečnost. Pod řízením Evropské komise ve spolupráci s Evropskou kosmickou agenturou (ESA) vznikl program Copernicus. Ten podpoří i projekt GEOSS Globálního pozorovacího systému Země. Po dlouhých přípravách byla v dubnu roku 2014 vypuštěna první družice a rozběhla se tak operační fáze projektu.

Kosmickou komponentu tvoří družice z řady Sentinel (v překladu ochránce) s podporou dalších desítek satelitů, poskytované jinými vesmírnými agenturami. Sentinely jsou rozděleny do pěti skupin, kdy každá má za úkol monitorovat něco jiného. Tyto skupiny jsou označeny čísly od 1 do 5. Jednotlivé družice dané skupiny jsou dále rozlišeny písmeny A, B, C, D. Důvod, proč se z každé řady vypouští více téměř identických družic je, že se navzájem doplňují a tím se zkracuje doba dostupnosti dat a je možné častěji získat informace dané oblasti.

Družice Sentinel fungují samostatně nebo v kombinaci s komponentami In-situ. Jsou to měřicí zařízení umístěná na zemi, moři nebo ve vzduchu, která doplňují a ověřují data pořízené družicemi. Naměřená data se pak ukládají a zpracovávají a cílem je poskytnout co nejspolehlivější a aktuální informace o stavu planety. Tato data lze použít třeba k vytvoření statistik a topografických map. Copernicus sleduje stav naší planety, ekosystémy a zároveň se snaží předpovědět možné přírodní nebo člověkem způsobené katastrofy.

Oblasti, na které je program zaměřen se dají rozdělit do šesti služeb: Monitorování území, Atmosféra, Krizové řízení, Bezpečnost, Mořské prostředí a Změny klimatu (Jutz & Milagro-Pérez, 2017).

1.4 Mise Sentinel-1

Mise Sentinel-1 se nyní skládají ze dvou družic Sentinel-1A, která byla vypuštěna 3. dubna 2014 a jedná se o vůbec první družici vyslanou programem Copernicus a dále družicí Sentinel-1B vypuštěnou 25. dubna 2016 (Potin, Rosich, Miranda, & Grimont, 2016). V následujících letech přibudou ještě Sentinel-1C Sentinel-1D. Družice slouží k monitorování zemského pokryvu, mořského ledu, oceánu, sledování lodní dopravy, ropného znečištění, přírodních katastrof jako jsou třeba sesuvy půd a zemětřesení, ale i zemědělství (Veloso et al., 2017). Navazují tak na úspěšné mise družic ERS-1 a Envisat. Na rozdíl od Sentinelů z dalších řad, které jsou vybaveny pasivními optickými senzory, Sentinel-1 nese na palubě jednofrekvenční radarový senzor SAR (Synthetic Aperture Radar) pracujícím ve spektrálním pásmu C (5404 MHz) snímající ve vlnové délce 5,6 cm.

Zemský povrch snímá ve čtyřech režimech v rozlišení od 5 do 40 m v závislosti na módu. Perioda snímání S1-A je každých 12 dnů. V kombinaci se S1-B se doba snižuje na polovinu, takže každých 6 dní jsou k dispozici nové snímky (Xiaofeng, 2017) (Potin, Rosich, Roeder, & Bargellini, 2014).

1.4.1 Radarový senzor SAR

Jak už zkratka slova radar (Radio Detection and Ranging) napovídá, jedná se o zařízení sloužící ke zjišťování přítomnosti objektů a jejich vzdálenosti. Funguje na principu mikrovlnných vln

obvykle v intervalu 1 mm až 1 m vlnové délky, které jsou radarem vysílány konkrétním směrem. Signál se šíří prostorem a odráží se od objektů - zemského povrchu. Měří se čas, jak dlouho trvá, než se odražený signál vrátí zpět. Na tomto základě se dá dopočítat, jak je sledovaný objekt vzdálený. Výhodou mikrovln je schopnost projít atmosférou za jakýchkoliv meteorologických podmínek či denní doby. Jsou schopné projít skrz oblaka, déšť, sníh či aerosol (James B. Campbell, 2002). Můžeme monitorovat i oblasti s nižším množstvím světla jako tomu je v polárních oblastech nebo za tmy. Uplatní se také v tropický a subtropických oblastech, kde je během roku vysoká oblačnost, na rozdíl od satelitů s pasivními senzory jako je tomu v případě třeba Sentinelu-2.

Radar se syntetickou aperturou SAR (Synthetic aperture radar) je typ radaru umožňující získávat obrazové snímky, kdy nejčastějším nosičem bývají právě družice. Pro interferometrické SAR (InSAR) je potřeba vždy alespoň dvou snímků té samé oblasti z různých úhlů. K tomu je zapotřebí dvou radarů, které jsou buď připevněny na stejném nosiči pracující zároveň, nebo se data získávají v různých časech jedním radarem, nebo spolupracují sesterské družice jako je tomu v případě Sentinelů. Sentinel-1A pracuje v tandemu se Sentinel-1B, kdy každý na palubě nese svůj jednofrekvenční radarový senzor a vzájemně se tak doplňují. Často jsou data využívána k tvorbě digitálního modelu terénu a sledování dlouhodobých nebo krátkodobých deformací terénu (Torres et al., 2012).

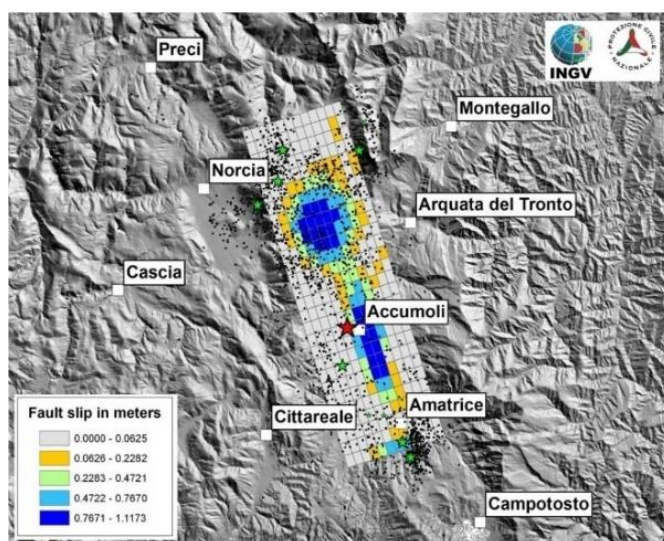
SAR snímek je tvořen pravidelnou mřížkou pixelů, které jsou složeny ze dvou údajů. Amplituda udává intenzitu odraženého záření a fáze udává informaci o fázovém posunu odraženého záření, ty představují informaci o okamžité vzdálenosti radaru.

1.4.2 Využití dat družic Sentinel-1

1.4.2.1 *Monitorování zemětřesení a rizika sesuvu půd*

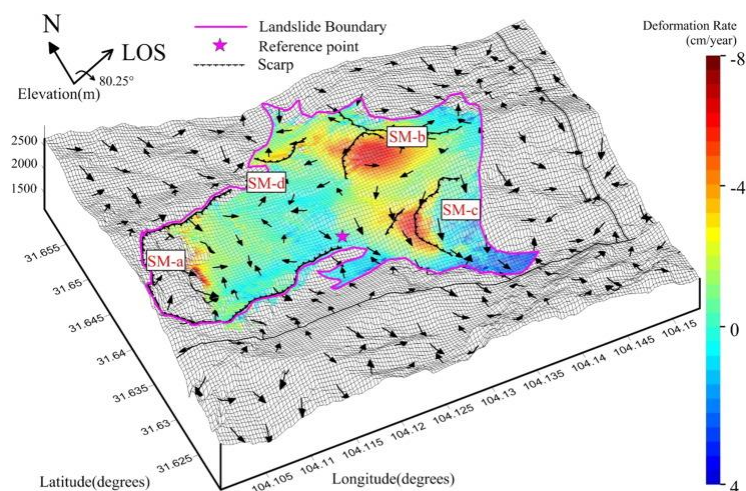
Existuje řada studií, které využívají dat programu Copernicus v oblasti krizového řízení a humanitární pomoci v krizových situacích. Studují pohyby půd či infrastruktury vlivem posunů tektonických desek a svahových sesuvů.

Příkladem může být oblast středních Apenin (Itálie), kde vlivem aktivních tektonických desek dochází k častým seismickým aktivitám. Týká se to především krajů Umbria, Marche a Lazio (Tondi, 2000). 24. srpna 2016 došlo dalšímu zemětřesení na hranicích krajů Umbria a Lazio a za pomoci dat ze Sentinel-1 byla oblast zmapována. Vědci z výzkumných institucí The National Research Council (CNR) a Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia vytvořili mapu, na které lze dobře vidět místa zasažených oblastí. Při porovnání snímků Sentinel-1 před a po zemětřesení byli vědci schopni analyzovat hlavní deformační místa, která ukázala poklesy až o 20 cm v oblasti Accumoli a pohyb do strany až o 16 cm. Data byla využita nejen ve vědecké oblasti, ale pomohla i při organizaci a zajišťování humanitární pomoci (ESA, 2016).



Obrázek 1 - Mapa - zemětřesení 24.8.2016, Itálie
Zdroj: (ESA, 2016)

Data Sentinelu-1 se uplatnila v monitorování sesuvů půd v provincii S'-čchuan v jihozápadní Číně ve studii (Dai et al., 2016). 12. května 2008 zasáhlo provincii zemětřesení o síle 7,9 stupně momentové škály. Rozsah sesuvů činil asi 35.000 km². Přispěl k tomu i nedostatek stromů, které by svými kořeny svahy zpevnily. Eroze půdy v zasažených oblastech stále probíhá a předpokládá se, že sypká rozrušená půda zůstane ještě po několik let nestabilní a mohlo by opět dojít k dalším sesuvům. Riziko narůstá zejména v létě, kdy se Čína potýká se silnými dešti. S využitím dat ze Sentinel-1 byl vytvořen model terénu viz obrázek č. 2, který znázorňuje pohyb svahů. Studie uvádí, že v některých místech je pohyb až 8 cm/rok. Proto je důležité oblast dlouhodobě sledovat a předpovídat další vývoj.



Obrázek 2 - Model terénu znázorňující rozsah sesuvu půd cm/rok, Čína
Zdroj: (Dai et al., 2016)

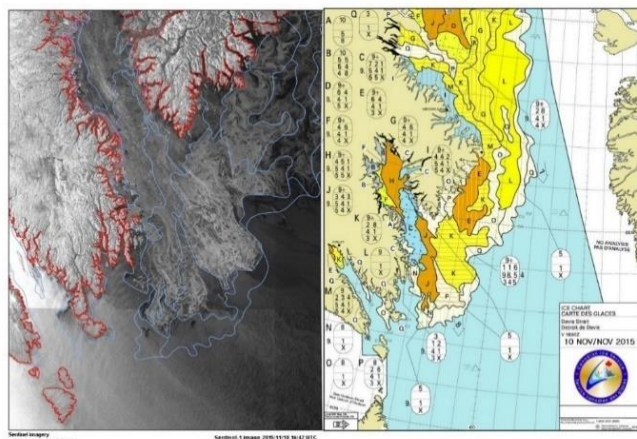
1.4.2.2 Ropné havárie

Ropa je jednou ze strategických energetických surovin a stále velmi žádanou komoditou. S tím jsou však spojena i rizika havárie a úniku ropy do životního prostředí – nejčastěji do moří, oceánů. Ať už při samotné těžbě hlubokomořskými vrty či při přepravě ropnými tankery. Ropa má menší hustotu než voda, a proto se drží na hladině, kde vytvoří tenký film. To má za následek úhyn organismů. Existuje řada studií, které se zabývají monitorováním ropných skvrn. Dosud byly používány družice ERS-1/2, ENVISAT, Radarsat-1/2, TerraSAR-X a COSMO-SkyMed, dostupnost byla mnohdy náročná a vyžadovala zvláštní dohodu s poskytovatelem. Sentinel-1 vyniká v dostupnosti dat v krátkém časovém intervalu. Využívá poloautomatického algoritmu NRT a je tak vhodný pro detekci úniku ropy, což potvrzuje práce (Traganos & Reinartz, 2017).

1.4.2.3 Monitorování zón mořského ledu a arktického prostředí

V polárních oblastech díky sklonu zemské osy je během roku nepravidelně rozloženo střídání dne a noci. Kvůli absenci slunečního záření a nepříznivým podmínkám v zimních měsících je vhodné právě použití satelitních snímků SAR. Sentinel-1 využívá kupříkladu Canadian Ice Service (CIS). CIS se zabývá sledováním ledovců, mořského ledu, jezer a sledováním kanadských pobřežních vod a jejich znečišťováním. SAR snímky však neodpoví úplně na všechny otázky a je potřeba pracovat i s daty viditelných, infračervených, pasivní mikrovlnných senzorů a

scatterometrů. Sentinel-1 umožňuje dobrou integraci s Radarsat 2 a s dalšími přispěvatelskými misemi. Ubývání ledovců v posledních letech, otevřelo nové možnosti těžby ropy a nerostů. To má za následek nejen únik ropy do moří a oceánů, ale souvisí s tím i nárůst lodní dopravy. Satelitní snímky poskytnou lepší informace o mořském ledu a volby vhodných bezpečnějších tras pro lodní dopravu (Arkett et al., 2012).



Obrázek 3 - Monitorování ledů Canadian Ice Service - Sentinel-1
Zdroj: (ESA, 2015)

1.5 Mise Sentinel-2

Sentinel-2 navazuje na mise SPOT a Landsat, na rozdíl od nich má lepší spektrální rozlišení a větší šířku záběru. Druhá řada družic je tvořena S2-A, který byl vypuštěn 23. června 2015 a S2-B vypuštěn 7. března 2017.

Sentinel-2 je určený ke sledování zemského pokryvu. Využití se najde ať už v oblasti zemědělství, lesnictví, od monitoringu životního prostředí po plánování měst. Pomůže odhadnout zdravotního stav rostlin, množství chlorofylu v listech, množství biomasy, dokáže klasifikovat druh a stáří lesního porostu. Snímky jsou často využívány k tvorbě vegetačních indexů a určování vegetačního stresu. V oblasti civilní bezpečnosti lze data využít třeba při sledování lesních požárů či dlouhodobého sucha. Neslouží jen ke sledování vegetace, ale monitoruje také mořské pobřežní oblasti, vnitrozemní vody, pomáhá odhadnout množství vody v krajině a vodních plochách, mapuje rozsah ledovců a jejich případný úbytek, pomáhá při krizovém řízení při povodních (Drusch et al., 2012).

Perioda snímání S2-A je každých 10 dnů, v kombinaci S2-B je doba poloviční, tedy 5 dní. Nad Evropou či Kanadou jedna z družic přelétne dokonce každé 2-3 dny. Rozlišení snímků se pohybuje od 10 do 60 m v závislosti na spektrálním pásmu viz tabulka č. 1.

1.5.1 Spektrální pásma MSI

Družice Sentinel-2 jsou vybaveny multispektrálním senzorem MSI (Multi Spectral Instrument), který zahrnuje 13 spektrálních pásem od viditelného VIS (visible) - modrá (490nm), zelená (560nm), červená (665nm) a blízkého infračerveného NIR (near infrared) 842nm ke krátkovlnnému infračervenému záření SWIR (short-wavelength infrared). Každé spektrální pásmo je snímáno v jiném rozlišení a využívá se k něčemu jinému. Některá pásma jsou využívána pro atmosférickou korekci – 443 nm, 490 nm pro aerosoly, 945 nm pro vodní páru a 1375 nm pro detekci oblačnosti. Najdeme tu čtyři pásma v červeném okraji viditelného spektra (705 nm, 740 nm, 783 nm a 865 nm), která otevírají široké možnosti při sledování stavu vegetace. Dále jsou tu dvě širší pásma SWIR krátkovlnná infračervená spektrální pásma s vlnovými délkami 1610 nm a 2190 nm, která se používají při zkoumání povrchu se sněhovou pokrývkou, ledovců nebo při posuzování stavu vegetace (Drusch et al., 2012).

Označení pásma	Střední vlnová délka (μm)	Prostorové rozlišení (m)	Šířka pásma (nm)	Využití
Band 1	443	60	20	Atmosférická korekce (aerosolový rozptyl)
Band 2 – modrá	490	10	65	Atmosférická korekce (aerosolový rozptyl); stárnutí vegetace, detekce karotenoidů a půdního pozadí;
Band 3 – zelená	560	10	35	Zelený vrchol citlivý na obsah chlorofylu
Band 4 – červená	665	10	30	Max. absorpce chlorofylu
Band 5 – red-edge	705	20	15	Oblast red edge, konsolidace atmosférických korekcí / fluorescence
Band 6 – red-edge	740	20	15	Oblast red edge; Atmosférická korekce; Detekce aerosolového zatížení
Band 7 – red-edge	783	20	20	Index listové plochy (LAI); okraj oblasti NIR
Band 8 – NIR	842	10	115	Index listové plochy (LAI)
Band 8A – NIR	865	20	20	Oblast NIR - citlivá na obsah chlorofylu a množství biomasy, index listové plochy (LAI) a detekce bílkovin; absorpce vodní páry; získávání aerosolového zatížení
Band 9 – vodní pára	945	60	20	Atmosférická korekce (absorpce vodní páry)
Band 10 – SWIR (cirrus)	1375	60	20	Atmosférická korekce (detekce tenkého cirru)
Band 11 – SWIR	1610	20	90	Citlivý na lignin, škrob a lesní biomasy nadzemní; rozlišení sněhu / ledu / mraků
Band 12 – SWIR	2190	20	180	Posouzení středomořských vegetačních podmínek; rozlišování jílovitých půd pro sledování eroze půdy; rozlišování živé a mrtvé biomasy, půdy, např. při mapování spálených ploch požárem

Tabulka 1 - MSI Spektrální pásma Sentinel-2
Zdroj: (van der Werff & van der Meer, 2015)

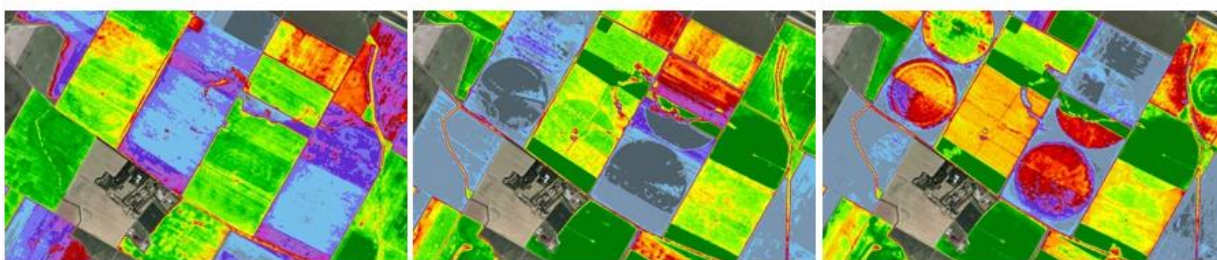
1.5.2 Využití dat družic Sentinel-2

1.5.2.1 Aplikace v precizním zemědělství

Satelitní snímky nabízí služby, které přispívají k lepšímu a efektivnímu zemědělství. Výhodou Sentinelů je, že snímky jsou dostupné všem a zdarma a vynikají v dostupnosti a aktuálnosti pouhých 5 dnů a v některých oblastech dokonce i v kratším časovém intervalu. Zemědělci tak mohou kontrolovat stav a sezónní vývoj plodin v průběhu celého roku a lokalizovat problematická místa. Monitorují zdraví a množství plodin, dokážou předpovědět dobu sklizně a tím i zvýšit svůj výnos. Společně v kombinaci s rozbořem půdy a dat ze Sentinelu lze vytvořit řadu rad a doporučení pro efektivnější používání hnojiv a pesticidů - kdy a v jakém množství. To

by mohlo vést ke snížení používané chemie a tím i snížení eutrofizace půd, povrchových vod a degradaci půdních částic. Díky vegetačním indexům se dají rozlišit druhy rostlin např. kukuřice od travních porostů v oblasti red-edge (Radoux et al., 2016).

Pro hodnocení zdraví vegetace se využívají různé vegetační indexy např. NDVI (The Normalized Difference Vegetation Index) ukazuje poměr vegetační složky díky rozdílné spektrální odrazivosti vegetace a půdy. Na obrázcích č. 4 lze vidět, jak se během sezóny měnil stav vegetace (Bontemps et al., 2015) (Veloso et al., 2017).



Obrázek 4 - Porovnání změn stavu vegetace - snímky map NDVI Sentinel-2
Zdroj: (ESA)

Index listové plochy LAI (Leaf area index) udává celkovou plochu listů na jeden m² půdy. Hodnoty 1-10 vypovídají o hustší vegetaci, zatímco hodnoty menší než 1 značí řídkou vegetaci, tedy paprsek na některých místech neprojde listem, ale dopadá přímo na půdu. Nejvyšší hodnoty budou vykazovat jehličnaté lesy, nižší listnaté lesy a nejnižší zemědělské plochy a poničená vegetace. Index je vhodný k hodnocení zdravotního stavu, fáze vývoje a druhu vegetace. Studie (Atzberger & Richter, 2012) (Richter, Hank, Vuolo, Mauser, & D'Urso, 2012), která prováděla výzkum na poli brambor, prokázala vhodnost zjišťování LAI za pomoci Sentinelu-2 v 10 m prostorovém rozlišení. Stejně tak i pro LCC (leaf chlorophyll content) a CCC (canopy chlorophyll content), (Jan G.P.W. Clevers, Kooistra, & van den Brande, 2017).

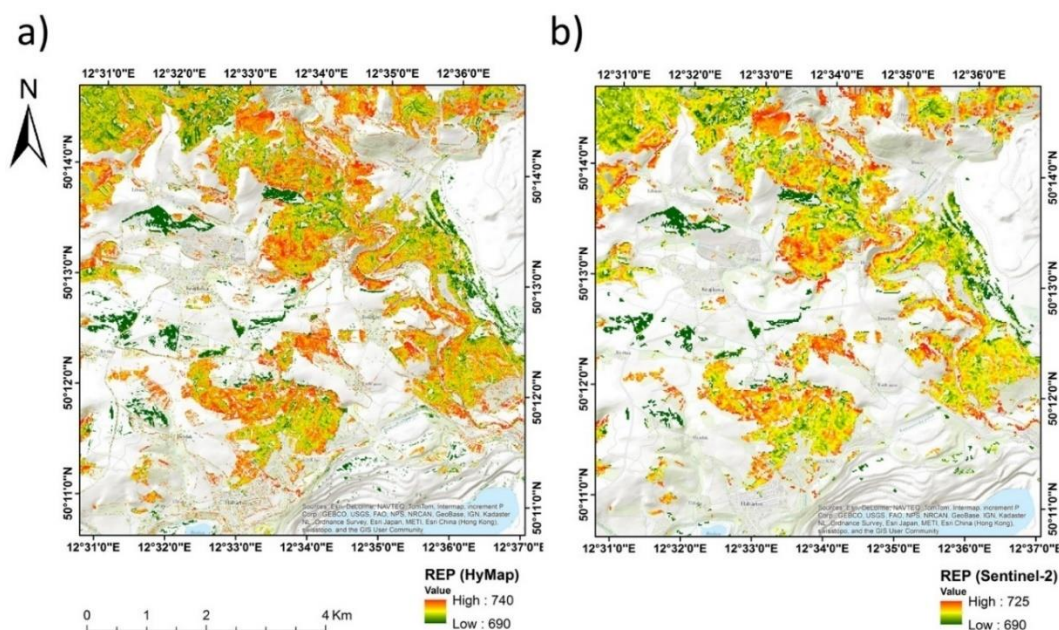
1.5.2.2 Monitorování obsahu železa vázaného na minerály v půdě

Železo (Fe) je čtvrtým nejčastějším prvkem nacházejícím se v zemské kůře. Stejně jako je v půdě důležitá přítomnost dusíku, fosforu a organická hmoty, tak je pro rostliny nepostradatelným prvkem železo. Železo tedy může být ukazatelem úrodnosti půdy a využití v oblasti pěstování

plodin. Pro mapování obsahu železa na základě údajů o jeho odrazivosti je zapotřebí poměrně vysokého spektrálního rozlišení. Ke kvantitativnímu obsahu železa v půdě byl již využíván Landsat a ASTER, ale jak uvádí studie (van der Werff & van der Meer, 2015) tyto družice snímají menší počet pásem v oblasti viditelného a blízkého infračerveného záření, zatímco Sentinel-2 má hned několik úzkých pásem v rozmezí 700-900 nm elektromagnetického spektra. Sentinel-2 se tak ukazuje jako vhodný nástroj pro sledování železitých minerálů jako jsou bronzit, goethit, jarosit či hematit nacházejících se v půdách a v důlním odpadu (van der Werff & van der Meer, 2015) (Van der Meer, van der Werff, & van Ruitenbeek, 2014).

1.5.2.3 *Hodnocení zdravotního stavu jehličnatých lesů*

Jednou z funkcí Sentinelu-2 je vegetační index REP, který se týká úzkého pásu vlnových délek v oblasti red edge a jedná se tedy o hyperspektrální data. Lze nimi zhodnotit zdravotní stav vegetace. Studie (Kopačková, Gholizadeh, Mišurec, Mielke, & Rogass, 2016) se zabývá hodnocením smrkových porostů se zaměřením na druh (*Picea abies* L. Karst.). Hodnoceny byly jen vzrostlé starší porosty. Průzkum byl proveden v oblasti Sokolovské pánve konkrétně v oblastech Erika, Habartov, Mezihorská a Studenec a byly posouzeny mapy z roku 2009 -2010. Jelikož v té době snímky ze Sentinelu-2 ještě neexistovaly, byla použita simulovaná data Sentinel-2 z HyMap. Dále byly odebrány jehlice smrků ze zájmových oblastí, které byly následně ohodnoceny v laboratoři. Práce byla ověřena reálnými daty Sentinelu-2. Ze studie vyplývá vhodnost využití dat Sentinelu-2 pro hodnocení vegetace.

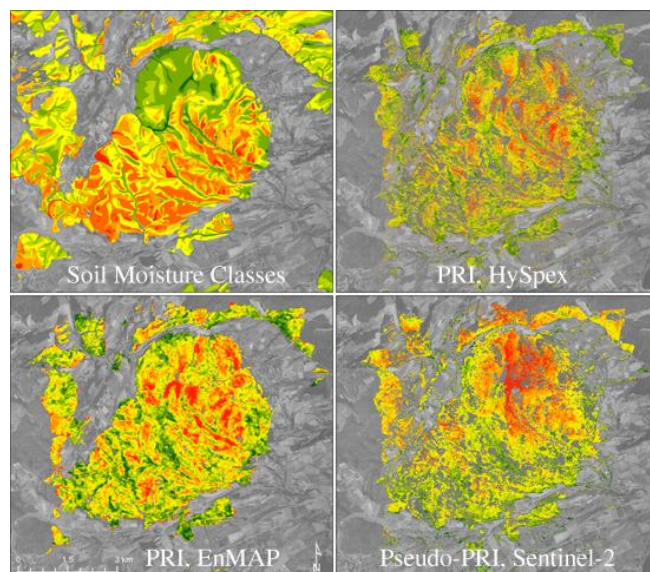


Obrázek 5 - Srovnání map REP HyMap z hyperspektrálních dat a simulovaných dat Sentinel-2
Zdroj: (Kopačková et al., 2016)

1.5.2.4 Hodnocení zdravotního stavu listnatých lesů

Oblasti jako je například jižní a střední část Evropy jsou zejména v teplých letních měsících postiženy dlouhodobým suchem. To má vliv i na místní vegetaci, u které dochází k nadměrné transpiraci a snížení množství chlorofylu vodním stresem. Míra stresu závisí na druhu rostlin, délce expozice a stresové toleranci (Rennenberg et al., 2006). Zvláště buk je považován za druh, který je relativně citlivý na sucho, stejně tak jako dub, který má podobné vlastnosti (Rascher, Nichol, Small, & Hendricks, 2007) (Backes & Leuschner, 2000). Touto problematikou se právě zabývá studie (Dotzler, Hill, Buddenbaum, & Stoffels, 2015), která využívá hyperspektrálních dat k vyhodnocení reakce listnatých druhů na vodní stres během letních suchých období. Práce je zaměřena na druhy dubů *Quercus petraea* a *Quercus robur* a buk *Fagus sylvatica* v oblasti německého Porýní-Falc v regionu Donnersberg.

Použitím vhodných funkcí byly ekvivalentní spektrální pásy Sentinel-2 generovány z dat HySpex. Dále jsou tato simulovaná data označena "Sentinel10". Předmětem práce bylo mapování změn koncentrace pigmentů vyvolaný vodním stresem. HySpex2.5 potvrzuje, že vybrané modelové parametry poskytují realistickou aproximaci spektrální variability pro listnaté lesy (Dotzler et al., 2015).



Obrázek 6 - Porovnání zdravotního stavu listnatých porostů různých systémů – Donnersberg
Zdroj: (Dotzler et al., 2015)

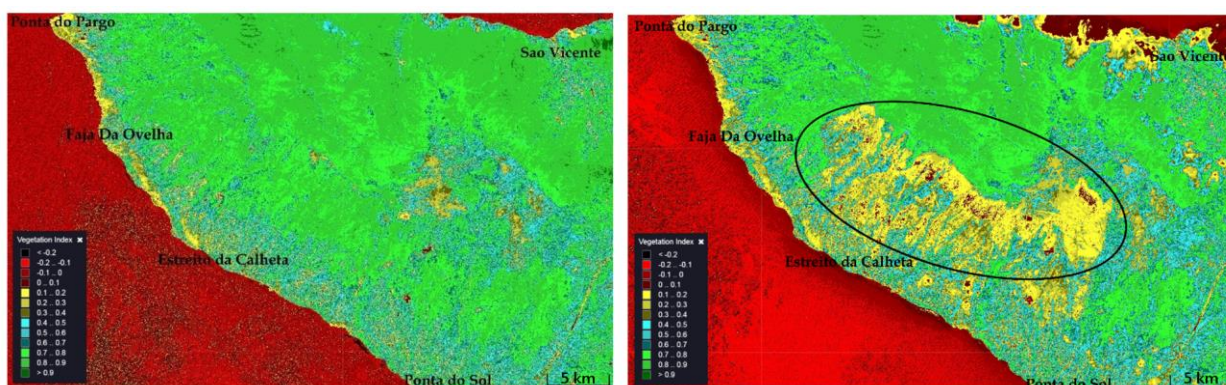
1.5.2.5 Monitoring suchých oblastí a ploch spálenými požáry

Sucho je přirozený jev, který může být způsoben nedostatkem srážek, nedostatkem podpovrchových vod a dalšími faktory, jako je teplota, vítr, struktura půdy a retenční schopnost krajiny. Dochází tak k usychání rostlin a úhynu živočichů. Sucho má velký vliv na výnosy v zemědělství. Rostliny vystavené nedostatku vody vykazují degradaci pigmentu snížením obsahu chlorofylu v listech, mění se i poměr chlorofylu oproti karotenoidu a nadměrnou transpirací dojde ke snížení obsahu listové vody, dochází také ke změně půdní vlhkosti či vegetace zmizí úplně, což vede ke změně odrazivosti v oblasti viditelného a červeného okraje blízkého infračerveného záření.

Práce (Fernández-Manso, Fernández-Manso, & Quintano, 2016) se zabývá potenciálem vlnových délek oblasti red-edge pro hodnocení spálených ploch požáry. Jako studijní oblast použili požár v Sierra Gata (Španělsko) z 6. - 11. srpna roku 2015, který vypálil 79,50 km² keřovitých a lesních porostů, kde převažovaly druhy *Pinus pinaster* a *Quercus pyrenaica*. Tato práce využívá reálná data ze Sentilu-2 pro studium v oblasti red-edge a zároveň je první prací, která využívá dat Sentinelu-2 pro hodnocení rozsahu požáru. Studie aplikovala různé typy vegetačních indexů, jako například normalizovaný vegetační index NDVI, PSRI (Plant Senescence Reflectance Index), Cire (Chlorophyll Index red-edge), NDre (Normalized Difference red-edge), SRre (Simple Ratio red-edge) a další. Jako nejvhodnější se ukázaly indexy založené na Band 5,

v oblasti red-edge citlivé na obsah chlorofylu, a Band 7 nebo Band 8, v oblasti blízkého infračerveného záření NIR, které se týkají zejména změn struktury listů. Zejména index Clre vykazoval maximální adekvátnost pro určení odhadu obsahu chlorofylu (Fernández-Manso et al., 2016).

Práce (Navarro et al., 2017) zas hodnotila spálené plochy na Madeiře (8. srpna 2016). Studie poprvé analyzuje rozsah požárů na Madeiře pomocí snímače MSI ze Sentinelu-2. Za pomoci vegetačních indexů jako jsou NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), NBR (Normalized Burn Ratio) mapovaly s rozlišením 10 m plochu spálených oblastí.

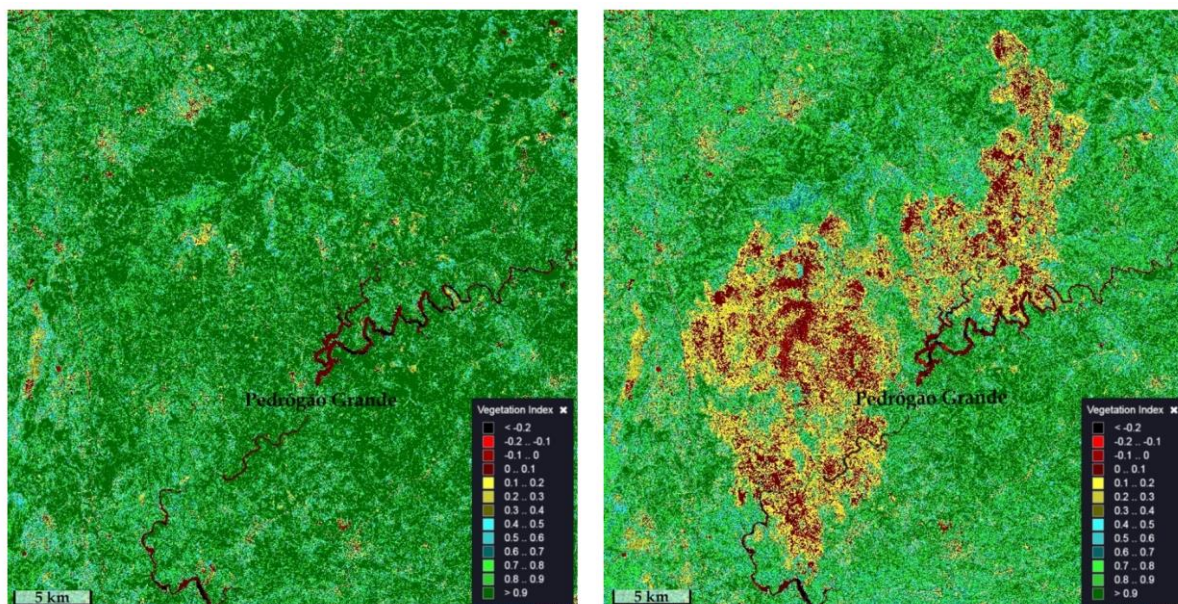


Obrázek 7 - Mapy NDVI Sentinel-2, mapa (vlevo) Madeira 7.8.2016 před požárem, mapa (vpravo) Madeira 17.8.2016 po požáru
Snímek vytvořen z (ESA, Sentinel Hub)

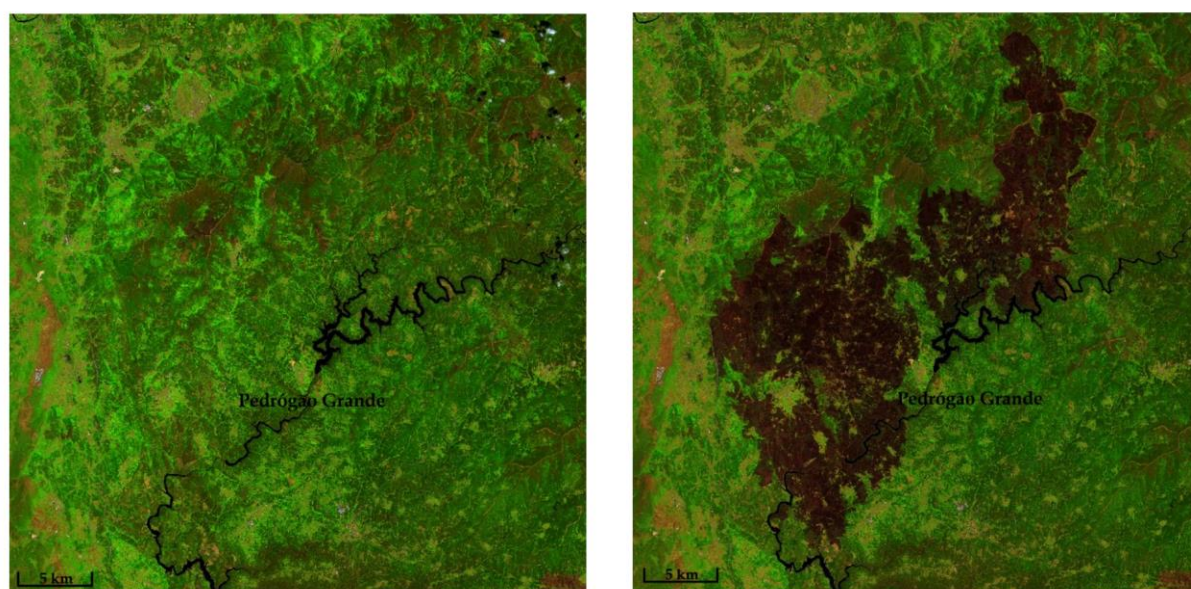


Obrázek 8 - Mapy s vegetačním indexem s využitím Bands 11, 8A a 22 Sentinel-2, mapa (vlevo) Madeira 7.8.2016 před požárem, mapa (vpravo) Madeira 17.8.2016 po požáru
Snímek vytvořen z (ESA, Sentinel Hub)

Další území zasažené požárem, které bylo detekovatelné pomocí Sentinelu-2, byla oblast Pedrogão Grande v Portugalsku (17. června 2017). Spálené plochy mají rozsah desítky kilometrů, jak je dobře vidět ze snímků č. 9 a 10.



Obrázek 9 - Mapy NDVI ze Sentinel-2, mapa (vlevo) Portugalsko 14.6.2017 před požárem, mapa (vpravo) Portugalsko 4.7.2017 po požáru
Snímek vytvořen z (ESA, Sentinel Hub)



Obrázek 10 - Mapy s vegetačním indexem s využitím Bands 11, 8A a 22 Sentinel-2, mapa (vlevo) Portugalsko 14.6.2017 před požárem, mapa (vpravo) Portugalsko 4.7.2017 po požáru
Snímek vytvořen z (ESA, Sentinel Hub)

1.5.2.6 *Monitoring vod a mořského prostředí*

Hodnocení kvality vod

Satelitní snímky družice Sentinel-2 pomůže s hodnocením kvality vody, slouží k pozorování změn ve vnitrozemských vodních tocích, pobřežních zón a hospodaření se zdroji vody.

Příkladem znečištění vod může být řeka Nil, kterou se zabývala studie (Salama, Radwan, & van der Velde, 2012), nebo třeba viditelné oblasti znečištění na Filipínách v ústí řek Taguig a Pasig do Laguna de Bay, o čemž vypovídají tmavé skvrny v severní části snímku viz obrázek č. 11. To je způsobeno odpadními vodami, pesticidy, hnojivy a průmyslovými znečišťujícími látkami, které vedou k zhoršení kvality vod.



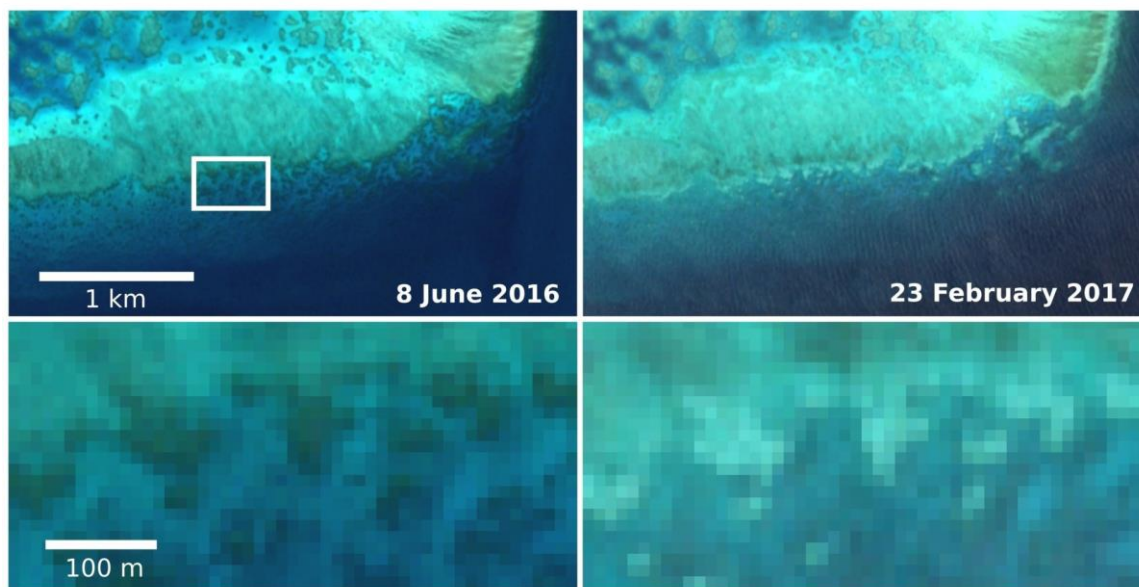
Obrázek 11 - Znečištění řek Taguig a Pasig ústící do Laguna de Bay – snímek Sentinel-2A, 8.5.2016
Zdroj: (ESA)

Dalším využití satelitních snímků Sentinelu-2 je monitorování chlorofylu a suspendovaných částic (SPM) v mořích a přílivových vodách. O této problematice pojednává studie (Gernez, Doxaran, & Barillé, 2017) zaměřující se na sledování zákalu, množství chlorofylu v mořích a jejich vlivu na ústřicové farmy v oblasti Bourgneuf Bay (Francie).

Mapování korálových útesů

Korálové útesy tvoří mozaiku benthického společenstva, které má nezastupitelnou ekologickou funkci. V důsledku zvýšené teploty moří ať už příčinou globálního oteplování, či jen vyšším prohřátí hlubších horizontů díky klidné vodě v období bezvětří, z korálů mizí jednobuněčné

symbiotické řasy, které korálům poskytují energii ze slunečního záření. Bez nich se stávají korály náchylnější a křehčí a dochází k takzvanému "bleaching" bělení.



Obrázek 12 - Sentinel-2 blednutí korálů - obrázek pořízen Copernicus Sentinel-2 (2016–2017)
Zdroj: (ESA)

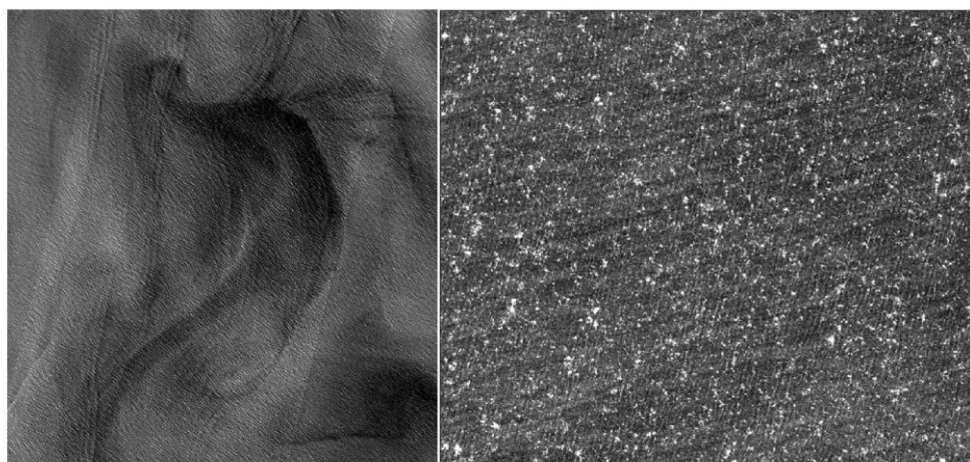
Odolnost korálů může být dále ovlivněna kyslejšími prostředím (Gattuso, Hoegh-Guldberg, & Pörtner, 2014), nebo nadměrným rybolovem jak uvádí studie (Hughes et al., 2007). Znalost struktury korálových společenstev je nezbytná pro pochopení mnoha procesů. Rozsah zasažených území se dříve sledoval pouze in situ, dnes je již tomu docíleno satelitním pozorováním. Například Landsat TM dokázal detekovat vybělené korály od 3 m (23% povrchu) do 17 m hloubky (100 % povrchu), podle procenta zasažených korálů ze snímaného území s rozlišením 30 x 30 m (Yamano & Tamura, 2004). Sentinel-2 rozšíří schopnost satelitního mapování zdravotního stavu korálových útesů díky lepšímu prostorovému rozlišení 10 x 10 m snímající v spektrálním pásmu v oblasti 490 - 665 nm a přesnější atmosférické korekce (Hedley, Roelfsema, Koetz, & Phinn, 2012). Projekt SEOM ESA Sen2Coral se zabýval schopností mapování vybělených korálů právě Sentinelem-2. Byly provedeny výzkumy v okolí ostrova Fatu Huku jižního Pacifiku, kde v důsledku vysoké teploty moře přesahující 30 °C dochází kvůli vylučování symbiotických řas k odbarvování korálů. Sentinel-2 se ukázal jako vhodný nástroj pro sledování korálových útesů a jejich zdravotního stavu.

Mapování luk mořských trav

Družicová data Sentinelu-2 se využívají i k mapování mořské vegetace v pobřežních oblastech. Studie (Traganos & Reinartz, 2017) se zabývá vhodností mapování mořské trávy za pomoci Sentinelu-2. Výzkum byl prováděn v oblasti Egejského moře se zaměřením na druhy *Posidonia oceanica* a *Cymodocea nodosa*, které se sledují v hloubkách 1,4 - 16,5 m s 10 m prostorovým rozlišením (Traganos & Reinartz, 2017). Louky mořských trav jsou pro vodní ekosystém ceněné, neboť poskytují široké ekosystémové služby, jsou útočištěm a potravou organismů a jsou součástí biogeochemických procesů. V posledních letech však jejich množství ubývá. Je proto potřeba shromažďovat informace a pochopit, k jakým procesům dochází a co jej ovlivňuje.

Mapování oceánských vln

Sentinel-2 hraje důležitou roli při mapování oceánských vln, které jsou způsobené větrem. Vlnové vzory jsou složité a velmi rozmanité. Díky slunečním odleskům lze určit množství informací o směru, výšce a pohybu vln. Tyto informace slouží zejména pro pobřežní farmáře, lodní dopravu a stavitele plošin a přístavů. Na snímcích jsou také vidět víry a směr mořských proudů, které se zobrazují jako tmavší pásy (viz obr. č. 13) (Kudryavtsev, Vladimir; Yurovskaya, Maria; Chapron, Bertrand; Collard, Fabrice; Donlon, 2017), (Kudryavtsev, Yurovskaya, Chapron, Collard, & Donlon, 2017).



Obrázek 13 - Mořské víry a odlesky mořské hladiny – snímek pořízen ze Sentinel-2A v blízkosti západní Austrálie 2016
Zdroj: (ESA)

1.6 Mise Sentinel-3

Mise Sentinel-3 bude sestávat ze dvou družic. Zatímco první družice této řady Sentinel-3A, která odstartovala 16. února 2016 a pokračuje ve sběru dat, na sesterské družici Sentinel-3B technici ještě pracují a na oběžnou dráhu by se měla dostat v roce 2018. Sentinel-1A nese na své palubě 4 typy senzorů, které poskytují optická, radarová tak i mikrovlnná data. Mise je zaměřena na globální monitoring povrchu a oceánů, měření jejich teploty a topografie povrchu moří, mořského a pevninského ledu a vnitrozemských vodních nádrží. Navazuje tak na družice ENVISAT (AATSR, MERIS) a Cryosat-2 (SIRAL). Sentinel-3 je vybaven 4 hlavními senzory – OLCI, SLSTR, SRAL a MWR, které se navzájem doplňují. Perioda dostupnosti dat se liší podle typu senzoru a informací, které sleduje. Takže doba může být 1 den až 27 dní. Stejně tak rozlišení se bude lišit, u některých je přesnost na 3 cm a u jiného senzoru až 1 km (Donlon et al., 2012).

1.6.1 OLCI

OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) je optický multispektrální senzor obsahující 21 spektrálních pásem. OLCI je nástupcem MERIS (Envisat). Spektrální pásma jsou stejná jako u MERIS, však OLCI je navíc obohacen o další 6 pásem viz tabulka č. 2. Přístroj je tvořen 5 kamerovými moduly. Zorné pole kamer je uspořádáno ve tvaru vějíře, kdy každá kamera snímá pod jiným úhlem, ale tak aby byla v zákrytu s tou sousední. Úhel snímání je dále ovlivněn slunečními odlesky, kdy je snaha o jejich minimalizaci. Senzor snímá v prostorovém rozlišení 300 m v intervalu každých 1,9 dne, po doplnění o Sentinel-3B bude doba pouze 0,9 dne (Donlon et al., 2012).

Označení pásma	Rozsah od [μm]	Rozsah do [μm]	Prostorové rozlišení [m]
Oa1	0.3925	0.4075	300.0
Oa2	0.4075	0.4175	300.0
Oa3	0.4375	0.4475	300.0
Oa4	0.485	0.495	300.0
Oa5	0.505	0.515	300.0
Oa6	0.555	0.565	300.0
Oa7	0.615	0.625	300.0
Oa8	0.66	0.67	300.0
Oa9	0.67	0.6775	300.0
Oa10	0.6775	0.685	300.0
Oa11	0.70375	0.71375	300.0
Oa12	0.71625	0.79125	300.0
Oa13	0.76	0.7625	300.0
Oa14	0.7625	0.76625	300.0
Oa15	0.76625	0.76875	300.0
Oa16	0.77125	0.78625	300.0
Oa17	0.855	0.875	300.0
Oa18	0.88	0.89	300.0
Oa19	0.895	0.905	300.0
Oa20	0.93	0.95	300.0
Oa21	1	1.04	300.0

Tabulka 2 - Sentinel-3 OLCI - 21 spektrálních pásem. Pásma označena modrou barvou jsou stejná jako u MERIS (Envisat), oranžově označená pásma jsou nová
Zdroj: (ESA, Sentinel-3 OLCI - Sentinel)

1.6.1.1 Využití OLCI

OSCI sleduje barvu vody ve viditelném spektru. Odlišné zabarvení vody je způsobeno přítomností prvků a biomasou fytoplanktonu. V okolí pobřeží a mělkých vod má na barvu vliv splach sedimentů, organických látek povrchovými vodami ústící do moří či míchání vody u břehů, kde vzniká zákal. Díky družicovým snímkům můžeme odhadnout čistou primární produkci a získáme tak představu o funkci oceánských ekosystémů a biogeochemických procesů. Dále nám poskytne informaci o kvalitě vody a množství vodní květu.

Další oblastí využití je sledování půdy a vegetačního pokryvu. Umožňuje výpočet indexů LAI, OTCI nebo FAPAR. LAI je index listové plochy, který vypovídá o celkové ploše listů vztahované na

jednotku plochy porostu. OTCI (OLCI Terrestrial Chlorophyll Index) je OLCI terestrický chlorofylový index, který silně koreluje s REP (red edge position). FAPAR (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) je podíl fotosynteticky aktivního záření pohlceného vegetací a slouží k hodnocení stavu vegetace.

OLCI najde své využití i při studiu atmosféry, klimatu a předpovědi počasí. Vodní pára jako hlavní ze skleníkových plynů hraje důležitou roli v atmosféře. OLCI se zaměřuje na sledování složení atmosféry především na vodní páru a troposférické aerosoly.

Další aplikací OLCI je zjišťování PAR (Photosynthetically Active Radiation) je to světlo takové vlnové délky, které rostliny využívají k fotosyntéze. Světelné spektrum bývá v rozmezí viditelného záření 400 - 700 nm, každý druh rostlin však využívá jinou vlnovou délku. Nároky rostlin se liší i v závislosti na vegetačním období (Devanthéry et al., 2016).

1.6.2 SLSTR

SLSTR (The Sea and Land Surface Temperature Radiometer) je optický multispektrální senzor obsahující 9 spektrálních pásem v rozsahu 545 - 11300 nm. Vlnové délky VIS viditelného záření a SWIR krátkovlnné infračervené záření mají rozlišení 500 m a MWIR (Mid-wavelength infrared) infračervené střední vlnové délky a FIR (Far-infrared) vzdálené infračervené záření snímají v rozlišení 1 kilometru. Stejně jako u OLCI je perioda 1,9 dne pro jednu družici, nebo 0,9 dne obě družice (Wooster, Xu, & Nightingale, 2012).

Označení pásma	Rozsah od [μm]	Rozsah do [μm]	Prostorové rozlišení [m]
S1	0.545	0.565	500
S2	0.659	0.669	500
S3	0.855	0.875	500
S4	1.3675	1.3825	500
S5	1.58	1.64	500
S6	2.225	2.275	500
S7	3.55	3.93	1000
S8	10.4	11.3	1000
S9	11.5	12.5	1000
F1	3.55	3.93	1000
F2	10.4	11.3	1000

Tabulka 3 - Sentinel-3 SLSTR - 11 spektrálních pásem
Zdroj: (ESA, SLSTR Introduction)

1.6.2.1 Využití SLSTR

Je zaměřen na snímání teploty takzvané SST (Sea Surface Temperature). Teplota je klíčovým ukazatelem. SLSTR je zaměřen na snímání teploty povrchu moří, čímž je mimo jiné sledovatelné i šíření proudů, teplotu mořského ledu důležité pro sledování globální klimatu, teplotu zemského povrchu a pomáhá k protipožárním opatřením a detekuje spálené plochy požáry větších rozsahů.

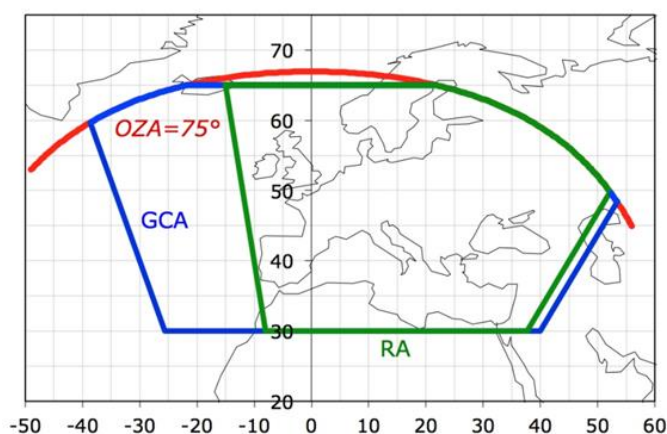
Jedna z vedlejších funkcí SLSTR je zjišťování AOT (Aerosol Optical Thickness) aerosolové optické tloušťky. V atmosféře je rozptýlen aerosol ve formě prachu, kouře, sazí nebo krystalků mořské soli vzniklé tříštění vln v oceánu což snižuje průchodnost slunečního záření, to je pak vyhodnocováno jako AOT (ESA, SLSTR Introduction).

1.6.3 SRAL a MWR

SRAL je rádiový dvoufrekvenční výškoměr. Přesnost výškového měření je od 300 m do 3 cm. Využívá dat z MWR (Microwave Radiometer) pro atmosférickou korekci. Je hlavním nástrojem pro topografii terénu.

1.7 Mise Sentinel-4

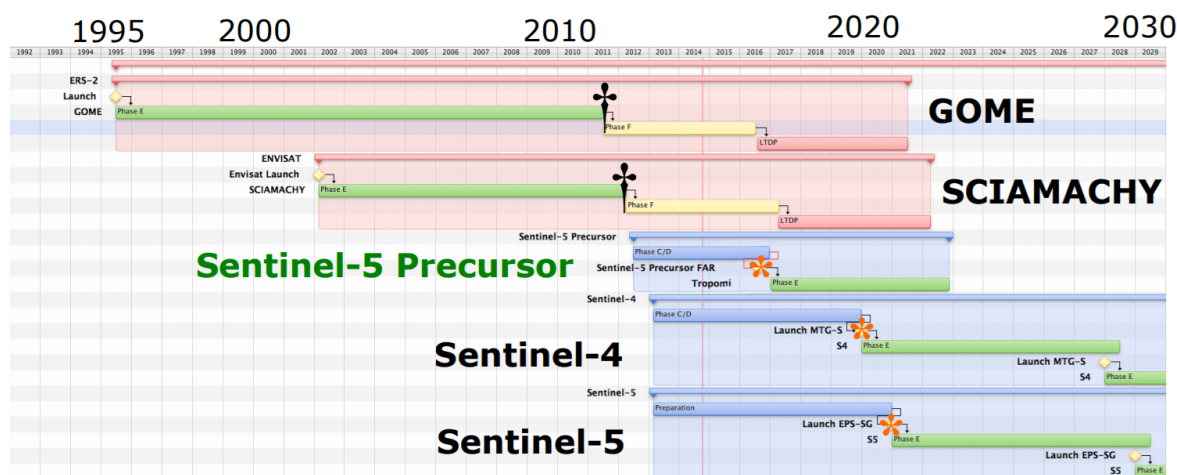
Sentinel-4 je zatím v přípravách, předpokládáné vypuštění první družice této řady by mělo proběhnout v roce 2019. Družice bude vybavena optickým multispektrálním senzorem UVN, snímajícím v 5 spektrálních pásmech v UV (305-400 nm), viditelném (400-500 nm) a blízkém infračerveném záření (750-775 nm). Cílem mise Sentinel-4 je sledování složení atmosféry vybraných stopových plynů ve vysokém prostorovém a časovém rozlišení, při jedné družici je předpokládaný časový interval pouze 1 hodina. Zaměří se na koncentrace troposférického O₃ (ozón), NO₂ (oxid dusičitý), SO₂ (oxid siřičitý) ať už antropogenního či sopečného původu, HCHO (formaldehyd), CHOCHO (glyoxal), měření slunečního záření a monitoring klimatu. Bude zaměřena na mapování oblasti v rozsahu 30° až 65° severní šířky a 30° západní délky až 45° východní délky, tedy Evropy a části severní Afriky viz obrázek č. 14.



Obrázek 14 - Oblast pokrytí Sentinel-4 (červená a modrá barva značí oblast pokrytí a zelená oblast pokrytí 1 hodiny)
Zdroj: (ESA, Sentinel-4)

1.8 Mise Sentinel-5 Precursor

Jelikož start první družice z mise Sentinel-5 je plánována až kolem roku 2020 a zároveň končí životnost přístroje SCIAMACHY na družici Envisat od ESA a přístroje OMI (Ozone Monitoring Instrument) na satelitu Aura od NASA a přístroje GOME na satelitu ERS-2, které jsou taktéž určeny ke sledování atmosféry, vznikl projekt Sentinel-5 Precursor, který vyplní časovou mezeru viz obrázek č. 20 mezi těmito obdobími. Start Sentinel-5P je plánován na 21. září 2017.



Obrázek 15 - Porovnání funkčního období GOME (ERS-2), SCIAMACHY (Envisat) a budoucích družic, Sentinel-5P, Sentinel-4, Sentinel-5, obrázek byl volně přepracován z dat: (ESA)

Družice je vybavena optickým multispektrálním spektrometrem TROPOMI snímající v 5 spektrálních pásmech od UV záření, viditelného (VIS) po blízkého infračerveného (NIR) a krátkovlnného infračerveného záření (SWIR). Perioda snímání je 17 dní. Sentinel-5P je zaměřen na sledování složení atmosféry a kvalitu ovzduší konkrétně na koncentrace stratosférického ozónu, NO₂, SO₂, formaldehydu, aerosolů, CO, metanu. Stopové prvky jsou určovány na základě odlišných specifických vlnových funkcí (ESA, SENTINEL-5P).

1.9 Mise Sentinel-5

Nástupcem po Sentinel-5 Precursor bude mise Sentinel-5, která se rozběhne až kolem roku 2020. Bude opět zaměřena na zjišťování kvality ovzduší a klimatu, měření slunečního záření, sledování množství stratosférického ozónu O₃, stopových plynů jako jsou NO₂, SO₂, HCHO, CO, CH₄ a aerosolů. Na rozdíl od Sentinelu-4 (taktéž zaměřen na atmosféru), kde se předpokládá krátký časový interval a to pouze 1 hodina, u Sentinelu-5 by měla být perioda 29 dní. Satelit

bude vybaven spektrometrem UVNS s vysokým rozlišením pracujícím v ultrafialovém až krátkovlnném infračerveném rozsahu se 7 různými spektrálními pásmy: UV-1 (270-300nm), UV-2 (300-370nm), VIS (370-500nm), NIR-1 (685-710nm), NIR-2 (755-773nm), SWIR-1 (1590-1675nm) a SWIR-3 (2305-2385nm). Prostorové rozlišení pro vlnové délky nad 300 nm bude nižší než 8 km pro vlnové délky nad 300 nm bude pod 50 km (ESA, Sentinel-5).

2 Případová studie

2.1 Úvod do problematiky

Jak už bylo popsáno výše, jednou z funkcí MSI senzoru mise Sentinel-2 je hodnocení zdravotního stavu vegetace pomocí vlnových délek v červené oblasti a blízkých infračervených vlnových délek. MSI senzor umožňuje kromě často používaných vegetačních indexů jako je NDVI, EVI a LAI také výpočet indexu REP (Red edge position). Tato část práce se bude zabývat právě tímto specifickým druhem vegetačního indexu. Cílem bude zodpovědět otázky, zda je REP z dat Sentinelu-2 vhodný pro hodnocení zdravotního stavu vegetace a zda prostorové rozlišení dat Sentinelu-2 umožňuje vyhodnotit zdraví vegetace na výsypkách a rekultivovaných plochách.

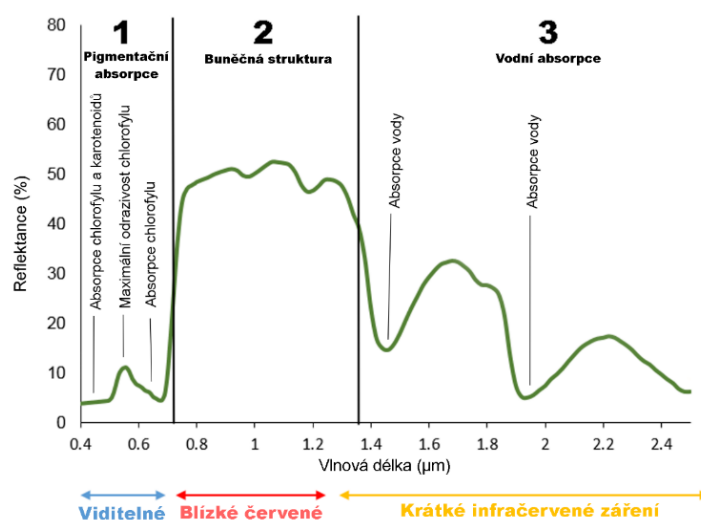
2.2 Spektrální projev vegetace

Při snímání vegetace lesů, luk i polí se ve viditelném spektru mohou zdát plochy na první pohled homogenní, povrchy vegetace však mohou mít odlišné spektrální odrazové vlastnosti. Ty mohou být způsobené odlišným druhem vegetace, jeho zdravotním stavem, obsahem chlorofylu a vody v listech, vnitřním a vnějším uspořádáním vegetace, geochemickým složením půdy a její případnou kontaminací a dalšími faktory.

Jako základní indikátor fyziologického stavu vegetace jsou rostlinná barviva – pigmenty, a to zejména chlorofyl a karoteny. V zelené části spektra kolem 550 nm je záření nejméně pohlcováno a tedy nejvíce odráženo, proto rostliny vidíme zeleně (Moss & Loomis, 1952). Naopak chlorofyl nejvíce pohlcuje záření v modré části spektra, které má maximum kolem 440 nm a v červené části mezi 660 a 680 nm (Sims & Gamon, 2002). V modré části je však absorpční maximum chlorofylů a karotenoidů přibližně stejné, a proto nejsou k určování chlorofylu vhodné. Využívá se tedy především oblast v blízké infračervené části spektra, kde vykazuje chlorofyl nejvyšší odrazivost (reflektanci). Z infračervených snímků lze například dobře rozeznat listnaté lesy od jehličnatých, které jsou podstatně tmavší než listnaté (Radoux et al., 2016).

Výsledkem měření vegetace může být spektrální křivka odrazivosti. Ta se dá podle vlnové délky rozdělit do třech specifických částí:

- 1) Zóna pigmentační absorpce (400-700 nm)
- 2) Zóna buněčné struktury (700-1300 nm)
- 3) Zóna vodní absorpce (1300-3000 nm).



Obrázek 16 - Spektrální křivka odrazivosti zdravé vegetace, obrázek byl volně přepracován
Zdroj: (Smith, 2012)

V oblasti viditelné a blízké infračervené části spektra, jak už bylo zmíněno výše, jsou nejlépe detekovatelná rostlinná barviva jako je právě chlorofyl, který je klíčový pro hodnocení zdravotního stavu vegetace.

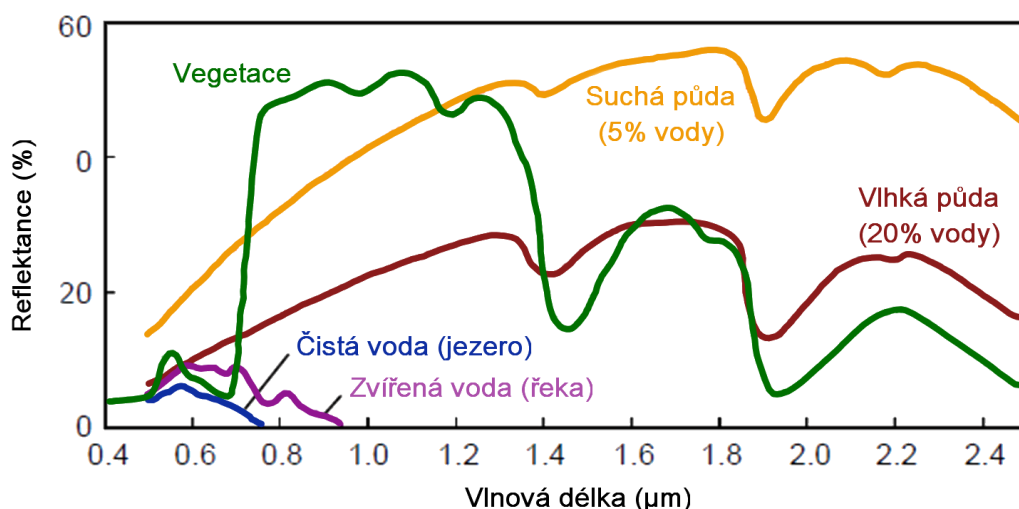
Odrazivost vegetace ve větších vlnových délkách v intervalu 700-1300 nm je vhodný k rozlišení rozdílných druhů rostlin. V této části spektra má totiž velký vliv na odrazivost listu jeho buněčná struktura a na základě rozdílného morfologického uspořádání jdou jednotlivé druhy od sebe odlišit. Mimo jiné v této části spektra lze určit i různé vegetační indexy a index listové plochy LAI (Leaf area index), který udává celkovou plochu listů na jeden m² půdy. V místech s větším množstvím vrstev listů v infračervené části spektra totiž dochází k opakovaným odrazům, čím více vrstev listů tím větší odrazivost.

V rozsahu 1300-3000 nm je odrazivost vegetace dána přítomností vody v listech, čímž se dá dobře sledovat vodní stres rostlin. Čím vegetace obsahuje méně vody tím je reflektance vyšší a naopak.

Tyto rozdílné vlastnosti reflektance v různých intervalech elektromagnetického záření nám pomohou odhalit stres a změnu fitness rostlin ještě dříve, než se fyzicky projeví změnou tvaru a barvou listů, následkem sucha, přemokření, mrazu či kontaminací chemickými látkami. Spektrální křivka vegetace se bude lišit v závislosti na druhu rostlin, vegetačním období a přírodních podmínkách (Bakker et al., 2009).

2.3 Spektrální chování dalších prvků krajiny

Jelikož má povrch vody, půdy či povrch antropogenních staveb odlišné odrazové vlastnosti, lze je spolehlivě odlišit od vegetačního pokryvu. Na obrázku č. 23 jsou znázorněny spektrální křivky, kde jsou dobře identifikovatelné rozdíly odrazivosti jednotlivých krajinných prvků v elektromagnetickém spektru (Smith, 2012).

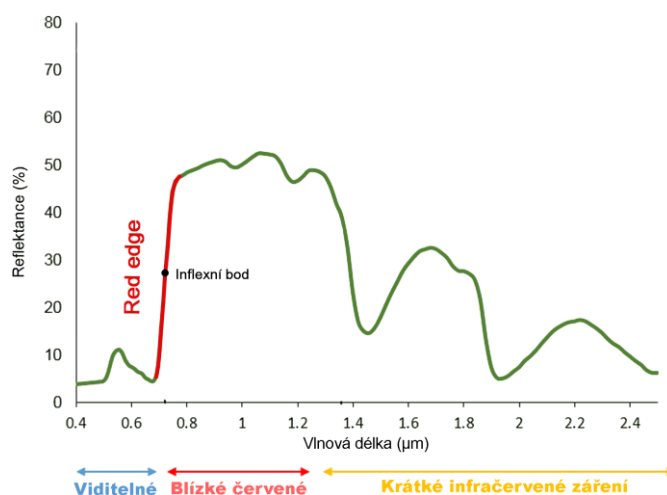


Obrázek 17 - Spektrální reflektanční křivka – porovnání odrazivosti vegetace, suché a vlhké půdy, čisté a zakalené vody, spektrální křivka byla volně přepracována
Zdroj: (Smith, 2012)

2.4 REP (red edge position)

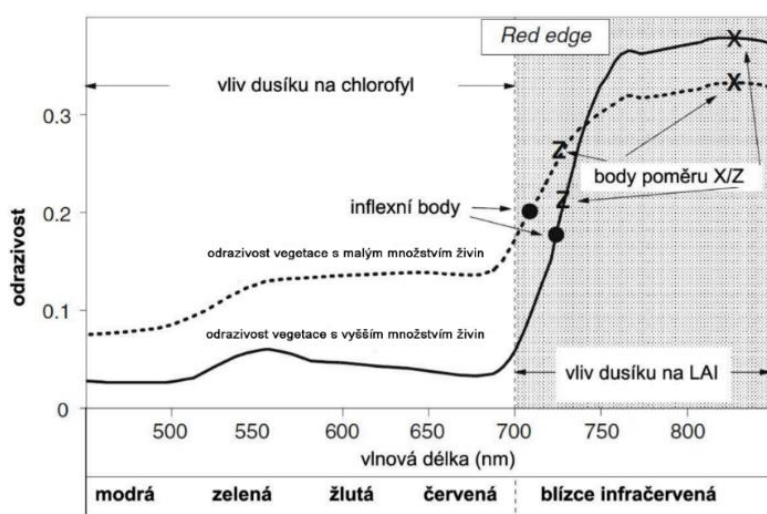
Zdravotní stav vegetace se dobře hodnotí v červené oblasti elektromagnetického spektra na rozhraní červené části viditelného a blízkého infračerveného záření.

Red edge position je typ vegetačního indexu, který udává maximální změnu odrazu, tedy polohu inflexního bodu křivky odrazivosti v oblasti red-edge.



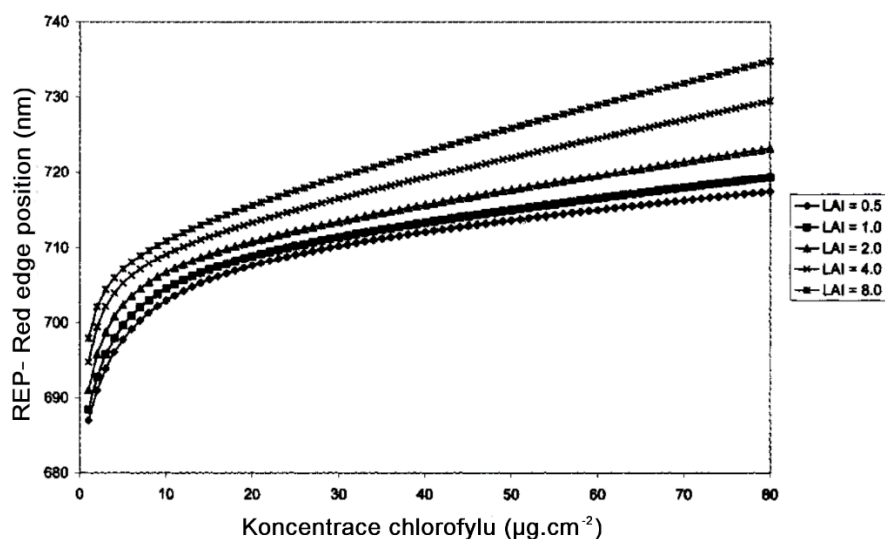
Obrázek 18 - Spektrální křivka vegetace - oblast red-edge, obrázek byl volně přepracován
Zdroj: (Smith, 2012)

Na rozdíl od jiných vegetačních indexů je REP definován pouze v úzkém pásu vlnových délek. Nejčastěji se REP pohybuje v intervalu 670 - 750 nm. Hodnota inflexního bodu je závislá především na obsahu chlorofylu. Hodnoty se budou lišit u rozdílných druhů rostlin v závislosti na vegetačním období, přírodních podmínkách a množství živin (Lukas et al., 2012).



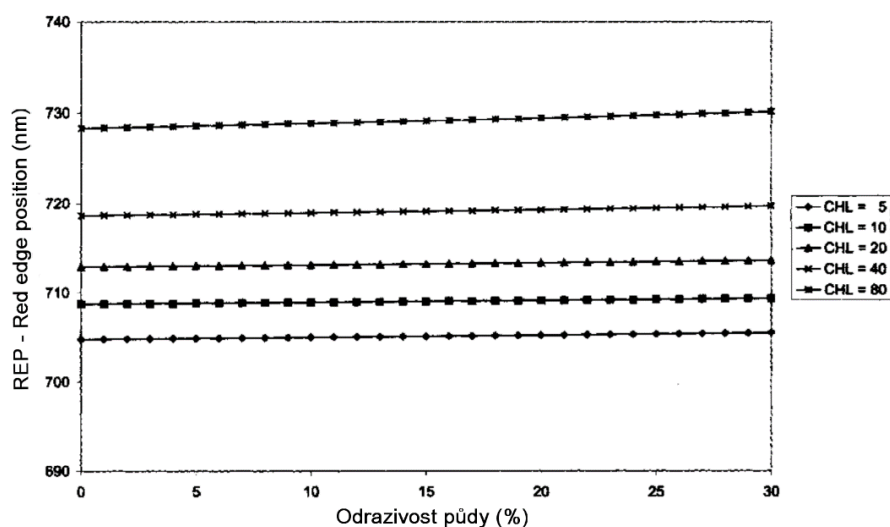
Obrázek 19 - Závislost reflektance listů v závislosti na dostupnosti živin
Zdroj: (Lukas et al., 2012)

Výhodou REP je vysoká senzitivita a na množství chlorofylu a na hustotu rostlinného pokryvu (LAI). Jak uvádí studie (Curran, Dungan, & Gholz, 1990) REP je jeden z nejlepších dálkových detektorů založených na obsahu chlorofylu. Při vyšších koncentracích chlorofylu či větší hustotě porostu bude hodnota REP vyšší, úbytek naopak způsobí posun do oblasti kratších vlnových délek viz obrázek č. 20.



Obrázek 20 - Vliv koncentrace chlorofylu na REP pro různé hodnoty LAI standardních plodin
Zdroj: (Clevers et al., 2000)

Oproti jiným indexům je REP výjimečný tím, že je méně zatížen nepřesnostmi způsobenými atmosférickými vlivy a minimálním vlivem odraženého záření od půdního pozadí viz obrázek č. 21 (Clevers et al., 2000).



Obrázek 21 - Vliv odrazivosti půdy na REP pro různé hodnoty LAI standardních plodin
Zdroj: (Clevers et al., 2000)

Další výhodou REPu je, že nedochází k takzvanému saturačnímu efektu, jako například u NDVI. K tomu může dojít při vysoké hodnotě LAI (indexu listové plochy porostu), kdy dojde maximálnímu nasycení při větší hustotě vegetace. Tedy například při 6-8 vrstvách listů dosáhne hodnota LAI maxima a nedojde tak k rozlišení další vrstvy navíc. Je to způsobeno tím, že NDVI je méně citlivý na obsah chlorofylu než REP.

2.5 Zájmová oblast jezero Medard

Jezero Medard se nachází v západní části Sokolovské hnědouhelné pánve v severozápadní části České republiky mezi Chebem a Karlovými Vary. Ze severu je Sokolovská pánev ohraničena krušnohorským zlomem, na severovýchodě sousedí se Severočeskou pánví, od které je oddělena stratovulkánem Doupovských hor. Z jižní strany je ohraničena ohareckým zlomem. Na jihozápadě dosahuje až k Chebské pánvi a je od ní oddělena hřbetem krystalických břídlíc. Pánev se rozkládá na ploše 312 km², s délkou 36 km a šířkou 9 km (Dimitrovský, 2001). Severozápadní Čechy ukrývají velké množství hnědouhelného bohatství. Tradice těžby hnědého uhlí na Sokolovsku sahá až do roku 1642, kdy je o ní první písemná zmínka. Od poloviny 17. století dochází k rozšíření těžby i v okolí Louček a Nového Sedla a postupně se dobývání uhlí rozšířilo na různá místa Sokolovska. Do roku 1945 převažovalo hlubinné dobývání, postupně však těžba přešla k povrchové těžbě s kulminací v druhé polovině 20. století. Předpokládaný zánik těžby uhlí na Sokolovsku se odhaduje kolem roku 2040 (Rojík, 2015).

Povrchová těžba má však velký vliv na životní prostředí a diametrálně mění ráz krajiny. Důležité je následné zahlazení po hornické činnosti. Těžba v prostoru Medard-Libík byla ukončena v roce 2000 a od roku 2002 byly zahájeny sanační a rekultivační práce.



*Obrázek 22 - Snímek ze zájmové oblasti u jezera Medard, 5.8.2017 (oblast C)
Foto: Hernová, Jana*

Název území	Plocha dotčená těžbou [ha]	vodní rekultivace	lesnická rekultivace	zemědělská rekultivace	ostatní rekultivace	celkem
Medard-Libík	1 183,00	506,15	532,26	35,19	20,29	1 093,89

Tabulka 4 - Typy rekultivací – Medard (Dimitrovský, 2001)

Obnova okolí jezera byla provedena zejména lesnickým způsobem, takzvaně přírodě blízkým. Rekultivace přirozenou sukcesí prostředí byla vyhodnocena jako nepříliš vhodná. Došlo by zřejmě k tvorbě lesního společenstva s nízkou biodiverzitou, které by bylo ovlivňováno kyselými důlními vodami (Hrajnohová Gillarová, Pecharová, & Kažmierski, 2010). Výsadba dřevin byla provedena tak, aby vznikla bohatá mozaika malých lesíků tvořených z různých druhů stromů, které jsou střídány zatravněnými plochami (Koubek & Poláčková, 2005). Při výběru vysazovaných dřevin bylo přihlédnuto k požadavku o přednosti původních dřevin jako jsou smrk ztepilý, borovice lesní, jasan ztepilý, dub letní a zimní, javor klen. Byly zde vysázeny ale i modřiny a olše.

2.6 Metoda zpracování dat

Pro případovou studii byly použity snímky multispektrálního senzoru MSI Sentinelu-2 z 27. května 2017 získané od společnosti ESA ze zájmové oblasti Medard. Data byla následně zpracována v programu Sentinel Application Platform (SNAP), kdy byl použit vegetační index REP typu 4PLIS, který se dle studie (Kopačková et al., 2016) ukázal jako vhodný pro hodnocení vegetace a odpovídal i hodnotám HyMap.

2.6.1 Atmosférická korekce

V případě viditelného a blízkého infračerveného záření je potřeba odstranění atmosférických efektů, takzvanou atmosférickou korekcí. U světla procházející atmosférou dochází ke dvěma jevům, absorpci a rozptylu světla na molekulách plynů, vodní páry a aerosolech, které mohou ovlivnit měřené hodnoty. Různé vlnové délky záření ovlivňují různé složky atmosféry, např. kyslík 760 nm. (Zemek, 2014). Pro případovou studii byla atmosférická korekce dat Sentinel-2 provedena Dr. Kopačkovou (ČGS).

2.6.2 Metodika výpočtu

Pro výpočet REP byl zvolen typ 4PLIS ze Sentinel-2 a byla použita následující funkce:

$$705 + 35 * ((B4 + B7)/2 - B5) / (B6 - B5)$$

Vzorec pro výpočet REP typu 4PLIS pro Sentinel-2 (J.G.P.W. Clevers & Gitelson, 2013)

Do vzorce byly dosazeny hodnoty středních vlnových délek pro pásma Sentinel-2:

B7 = 783 nm (15 nm)

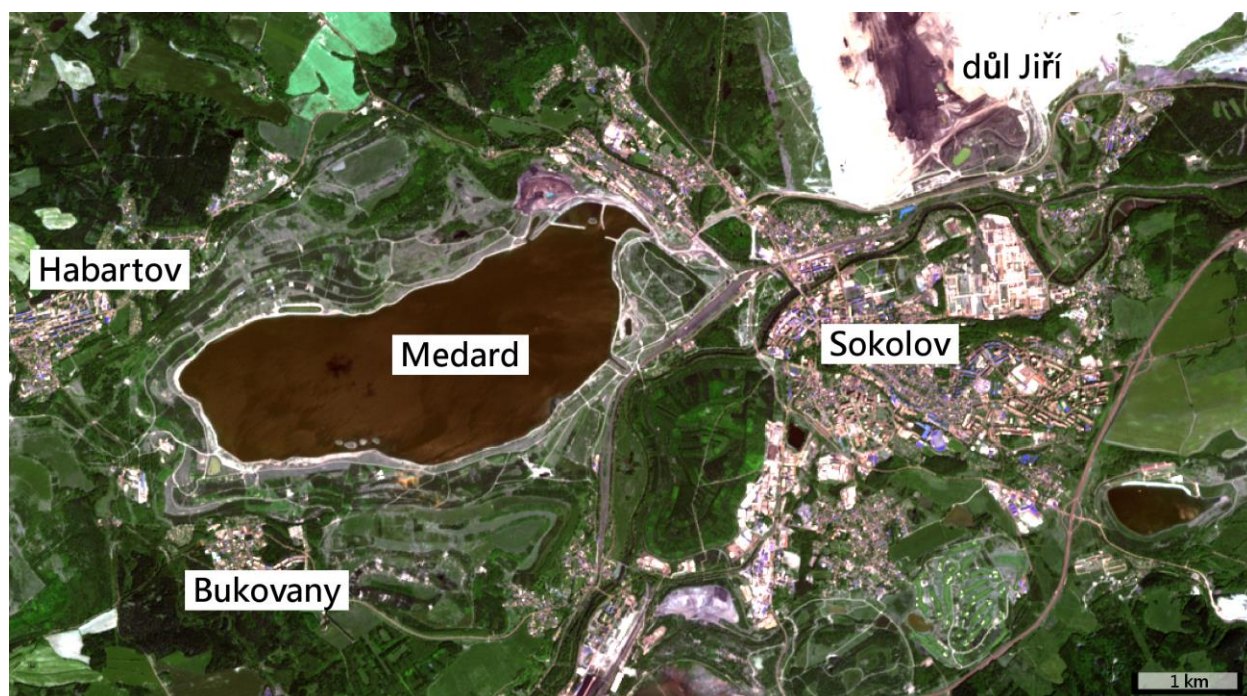
B6 = 740 nm (15 nm)

B5 = 705 nm (15 nm)

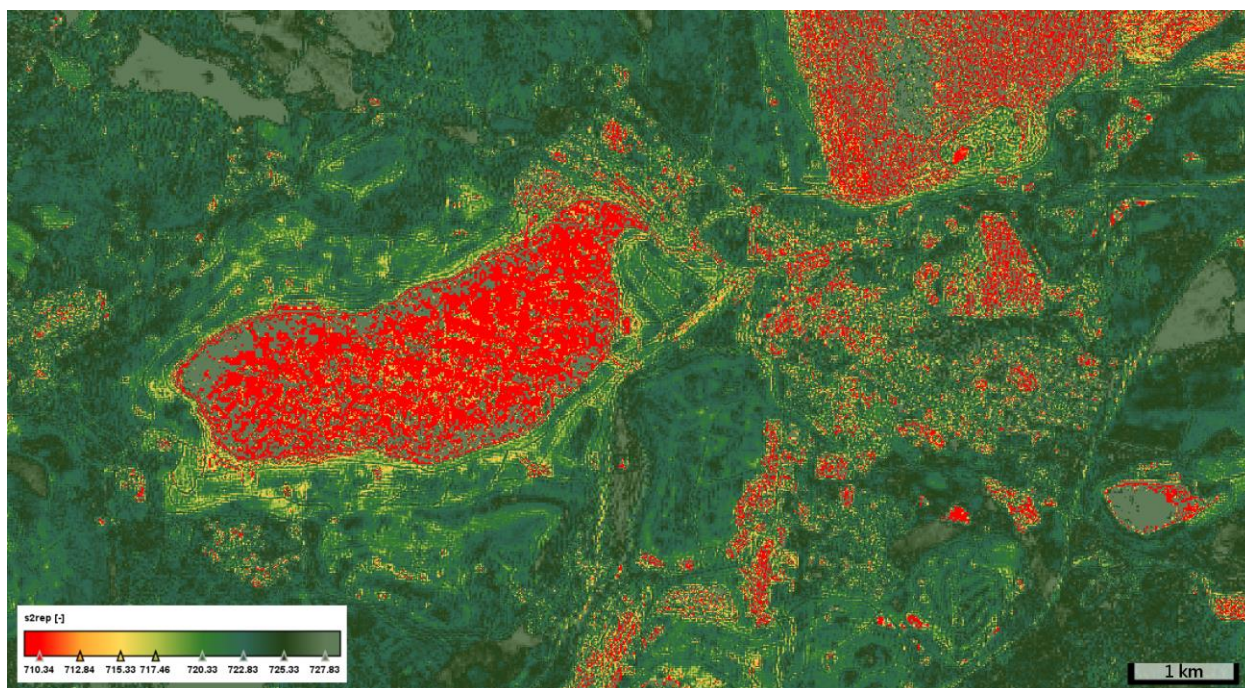
B4 = 665 nm (30 nm).

Pro lepší rozlišitelnost byl interval REP omezen pouze na vlnové délky 710-727 nm.

Výsledkem je mapa viz obrázek č. 24.



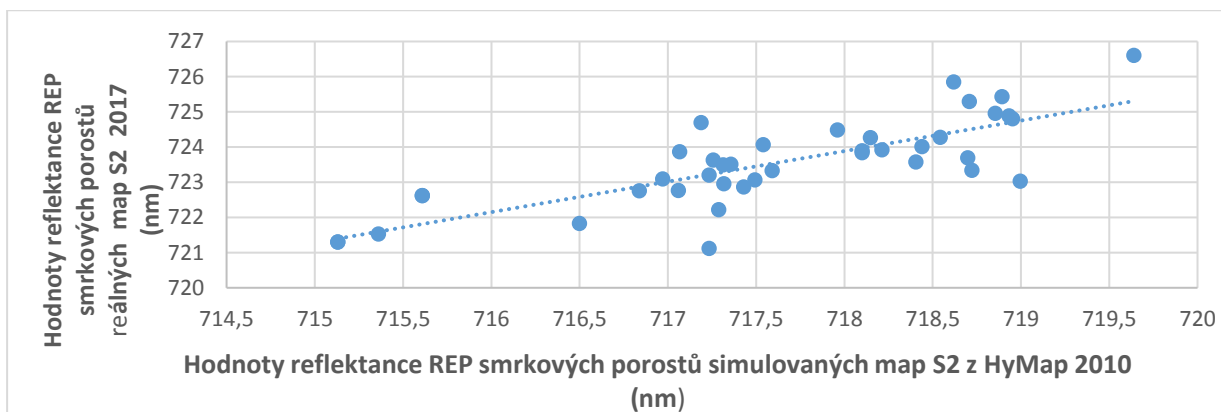
Obrázek 23 - Mapa ve viditelném spektru ze Sentinel-2, pohled na jezero Medard a blízké okolí 27.5.2017
Zdroj: Hernová, Jana



Obrázek 24 - Mapa REP pořízená ze Sentinel-2 - pohled na jezero Medard a jeho okolí 27.5.2017
Zdroj: Hernová, Jana

2.6.3 Validace dat

Pro ověření správnosti hodnot REP bylo potřeba vytvořenou mapu porovnat s validovanými daty. Bylo vycházeno z poznatků studie (Kopačková, Mišurec, Lhotáková, Oulehle, & Albrechtová, 2014), která ukázala, že hodnoty reflektance odečtených z HyMap odpovídají hodnotám reflektance odebraných vzorků jehlic smrků, které prošly laboratorní analýzou. Proto byla pro ověření dat vytvořené mapy (z reálných dat) použita mapa REP (stejně zájmové oblasti) ze simulovaných dat Sentinelu-2 v HyMap pořízená roku 2010.



Graf: Závislost hodnot reflektancí REP ze simulovaných dat map 2010 a reálných dat map 2017
Zdroj: Hernová, Jana

Oblast	1	2	3	4	5	6	7	8
2010	718,99566	718,21221	718,69885	718,72290	718,54272	718,40570	718,10058	718,10057
2017	723,03186	723,9198	723,68707	723,33673	724,27521	723,57288	723,89343	723,83636

Oblast	9	10	11	12	13	14	15	16
2010	718,61914	718,70745	718,43866	718,89251	717,05950	716,49932	717,28735	717,42871
2017	725,84528	725,29718	724,00702	725,43164	722,76794	721,82947	722,21942	722,86682

Oblast	17	18	19	20	21	22	23	24
2010	716,83807	717,96002	717,53918	717,18890	718,95251	718,93225	719,63958	718,85394
2017	722,75702	724,48102	724,06262	724,69354	724,80444	724,88293	726,60034	724,95544

Oblast	25	26	27	28	29	30	31	32
2010	715,36077	715,60907	717,23303	715,13018	717,49365	718,15380	717,33209	717,31683
2017	721,52802	722,61584	721,11542	721,29602	723,06329	722,18756	723,06958	722,95306

Oblast	33	34	35	36	37	38	39	40
2010	717,35730	718,14831	717,25738	717,59161	717,06720	717,31317	716,97094	717,23303
2017	723,50812	724,26361	723,62354	723,33105	723,86188	723,48883	723,08813	723,19592

Tabulka 5 - Naměřené hodnoty reflektancí (nm) ze simulovaných dat z map 2010 a reálných dat z map 2017

Zdroj: Hernová, Jana

Pro porovnání byly vybrány lokality se vzrostlým smrkovým porostem, kde se předpokládá že mezi měřeními nedošlo během let k výrazným změnám. Z naměřených hodnot je patrné, že data z mapy pořízené v roce 2017 jsou mírně vyšší. To je pravděpodobně způsobeno tím, že data z roku 2010 jsou simulovaná. Další, avšak nepříliš výrazný vliv může být způsoben přírůstkem biomasy, nebo naopak zhoršením kondice lesa. Z toho důvodu byla data pro srovnání vybrána z různých lokalit a to z 10 lokalit smrkové monokultury vždy po 4 bodech. Hodnoty reflektancí jsou uvedeny v tabulce č. 5, poloha zájmových bodů je uvedena v příloze č. 1.

Z naměřených hodnot vyplývá, že spočítaný REP z dat Sentinelu-2 (2017) je v lineárním vztahu s HyMap a tím pádem i v lineárním vztahu s chlorofylem a můžeme ho tedy použít pro hodnocení zdraví vegetace.

2.7 Diskuze

2.7.1 Prostorové rozlišení

Otázkou je, zda prostorové rozlišení dat Sentinelu-2 umožňuje vyhodnotit zdraví vegetace na výsypkách a rekultivovaných plochách.

Zatímco předchůdce Sentinelu-2 MERIS snímá REP v prostorovém rozlišení 300 m, Sentinel-2 pořizuje data v prostorovém rozlišení 10-20 m. Navíc by měl Sentinel-2 být přesnější, neboť v pásmu 6 (740 nm) měří odrazivost v horní části lineárního sklonu oblasti red-edge, zatímco MERIS v pásmu 10 (753,75 nm) měří odrazivost mírně nad linií red-edge. Existují i letecké hyperspektrální senzory s lepším prostorovým a spektrálním rozlišením, k zjišťování REP jako je např. HyMap. Jeho nosičem bývá malé letadlo, která létá ve výškové hladině 2000 – 5000 m. Nejčastěji snímá v prostorovém rozlišení 5 m (prostorové rozlišení dat závisí na letové výšce letadla), nevýhodou je však nízká dostupnost a vysoké finanční nároky na pořízení leteckých dat (Cocks, Jenssen, Stewart, Wilson, & Shields, 1998).

Prostorové a spektrální rozlišení Sentinelu-2 je v porovnání se snímanými daty z HyMap sice horší, jeho nespornou výhodou je však jeho dostupnost jak pro odborníky z různých oblastí, tak pro širokou veřejnost.

Jak potvrzuje práce (Kopačková et al., 2016), data ze Sentinelu-2 pro REP vykazují odpovídající hodnoty jako u ověřených a dlouhodobě používaných HyMap, takže se Sentinel-2 ukazuje jako vhodný nástroj pro sledování a hodnocení stavu vegetace.

Při vyhodnocení je však třeba zohlednit, že se na ploše, která činí 20 x 20 m/pixel hodnoty reflektance průměrují. Proto je vhodné sledování zejména větších ploch. Výsypky a rekultivované plochy jsou většinou území čítající i stovky hektarů, a proto se ukazuje prostorové rozlišení 20 x 20 m / pixel jako dostačující.

2.7.2 Zhodnocení map REP ze Sentinelu-2 zájmové oblasti

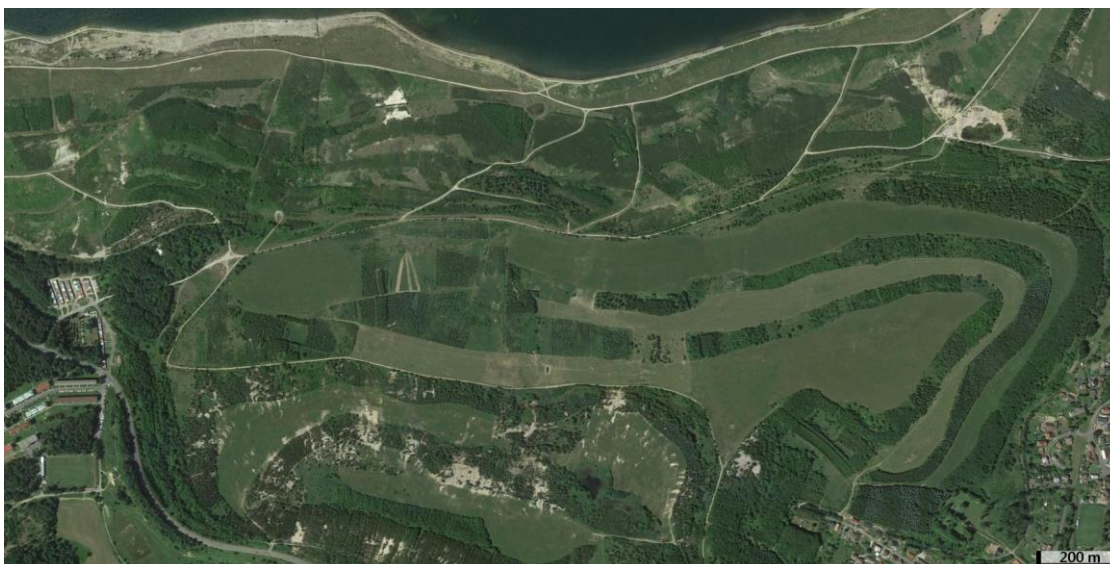
Sledovaná oblast okolí Medardu je z hlediska druhové skladby vegetace tvořena mozaikou různě starých a různých druhů rostlin, které v této závislosti mají různou odrazivost. Ze satelitního snímku je obtížné určit, o který druh kultur se přesně jedná a jakého je stáří. Pro hodnocení zdraví jednotlivých druhů je nutné si terénním průzkumem ověřit, o jaký se jedná zájmový druh.

Pro zhodnocení zdravotního stavu smrků bylo vycházeno z práce (Kopačková et al., 2014), kde podle obsahu chlorofylu v jehlicích a vlnových délek odrazivosti jehlic byly stanoveny hodnoty pro rozdělení do 5 tříd podle zdraví (1 nejhorší, 5 nejlepší).

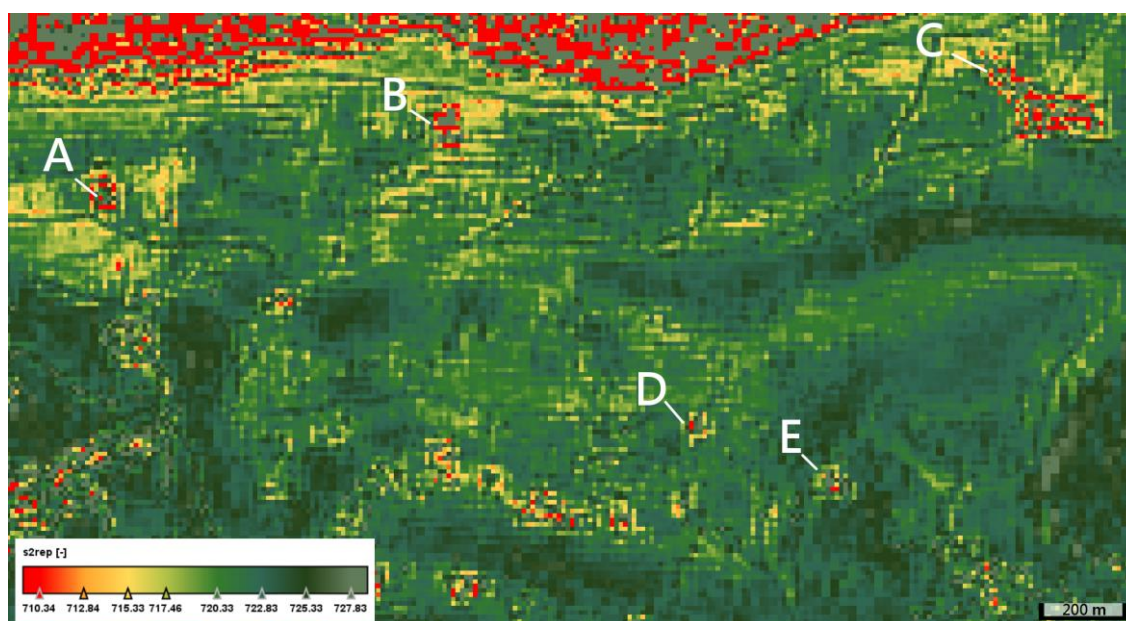
	Cab		Rep		ExpSIPI	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
2009						
Class 1	1.60	0.46	714.86	1.03	2.96	0.23
Class 2	2.15	0.34	715.96	0.74	2.80	0.10
Class 3	2.65	0.31	717.04	0.58	2.75	0.05
Class 4	3.25	0.46	718.24	0.78	2.71	0.05
Class 5	3.55	0.53	718.91	0.68	2.63	0.05
2010						
Class 1	1.87	0.24	716.49	0.91	2.88	0.16
Class 2	2.16	0.18	716.94	0.69	2.74	0.06
Class 3	2.45	0.08	717.63	0.61	2.69	0.06
Class 4	2.76	0.26	718.86	0.86	2.63	0.08
Class 5	2.99	0.27	719.55	0.59	2.53	0.06

Tabulka 6 - Rozdělení 5 tříd podle zdravotního stavu smrků dle reflektance - HyMap
Tabulka převzata ze studie (Kopačková et al., 2014)

Ve sledované oblasti okolí Medard monokultury smrků vykazovaly hodnoty REP (z reálných dat 2017) v rozmezí od 716-720 nm přičemž po převedení hodnot podle studie (Kopačková et al., 2014) by zdravý les měl odpovídat hodnotám 724-726 nm. Nyní by se dal zařadit do kategorie č. 1, tedy do třídy s nejmenším množstvím chlorofylu. Z takto nízkých hodnot nemusí nutně vyplývat, že by smrky na výsypce byly v tak špatném stavu, ale nízké hodnoty jsou způsobené také tím, že hodnotíme jen pár let staré lesy a třídy, pro které byly vlnové délky REP definované jsou nastavené pro lesy ve stáří 40-80 let.



Obrázek 25 - Letecký snímek zájmové oblasti Medard 24.6.2016
Zdroj: Google Earth



Obrázek 26 - Mapa REP ze Sentinelu-2 27.5.2017 zájmové oblasti Medard s vyznačenými dokumentovanými oblastmi A-E
Zdroj: Hernová, Jana

Z map na obrázku č. 24 a č. 26 lze dobře vidět, že zrekultivované oblasti v okolí Medardu ještě nedosahují hodnot jako starší víceleté rekultivace či zdravé porosty v ideálních podmínkách. Z map jsou detekovatelná místa, která vykazují horší stav vegetace či místa, kde vegetace chybí úplně. Takové oblasti v mapě symbolizuje oranžová a červená barva. Tato vybraná problematická místa vyčtená z mapy byla následně posouzena v terénu. Dokumentované oblasti byly označeny písmeny A-E.

Horší stav vegetace je dán špatnou kvalitou půd, kde převažují zejména jíly a písky. Chybí zde humusový horizont, který je přirozeně tvořen opadem vegetace a rozkladem organické hmoty mikrobiální činností, což poskytuje vhodné podmínky pro růst rostlin.



*Obrázek 27 - Foto Půdní pokryv (vlevo) - oblast A – Medard, (vpravo) - oblast E – Medard, 5.8.2017
Foto: Hernová, Jana*

Problematická místa se týkají jak travních ploch, tak i lesních porostů. Kolem Medardu můžeme najít nehostinné oblasti, které byly určeny pro lesnickou rekultivaci a na těchto místech byly vysázeny stovky sazenic jehličnanů, které se však důsledkem neúrodné půdy neuchytily.



*Obrázek 28 - Uhynulé sazenice smrků - oblast A – Medard, 5.8.2017
Foto: Hernová, Jana*

Jak lze vidět z fotodokumentace, zhoršený stav vegetace je dán i špatným odvodněním. Pohyb vody modeluje terén, vytváří se stružky, které odvádí půdní materiál.



*Obrázek 29 - Vymleté stružky (vlevo) oblast D - Medard, (vpravo) oblast B – Medard 5.8.2017
Foto: Hernová, Jana*

Průzkumem vytypovaných oblastí z mapy se prokázalo, že všechna vykazují špatnou kondici porostu. Můžeme tedy říct, že mapa pořízená ze Sentinelu-2 s funkcí REP je vhodná pro dlouhodobé sledování oblasti a porovnání v čase. Ze získaných informací lze určit trend a vývoj porostu sledované oblasti.

2.8 Závěr

Družice řad Sentinel jsou bezpochyby nezastupitelným nástrojem pro sledování povrchu Země a mají obrovský potenciál a široké možnosti využití v enviromentálních vědách. Jejich nepřehlédnutelnou předností je zejména prostorové pokrytí, výborná časová aktuálnost a všeobecná dostupnost zdarma nejen pro vědecké instituce, ale i pro širokou veřejnost. Program Copernicus je zatím na svém počátku, jeho všechny možnosti ještě nejsou plně prozkoumány a rozvinuty a v budoucnu nám poskytne jistě spoustu informací pro pochopení procesů na naší planetě.

Vegetační index REP ze Sentinelu-2 se ukázal jako vhodný prostředek k hodnocení zdraví vegetace na výsypkách a rekultivovaných plochách v 10-20 m prostorovém rozlišení. Prozatím je jen málo studií, které se touto problematikou zabývají a je třeba podrobit tuto oblast dalšímu zkoumání.

2.9 Seznam literatury

- Arkett, M., Carrieres, T., Zagon, T., Zabeline, V., Buehner, M., Caya, A., ... Centre, C. M. (2012). Preparations By the Canadian Ice Service for Future Earth. In *Earth Observation and Cryosphere Science Conf.* (pp. 13–16).
- Atzberger, C., & Richter, K. (2012). Spatially constrained inversion of radiative transfer models for improved LAI mapping from future Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 120, 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.035>
- Backes, K., & Leuschner, C. (2000). Leaf water relations of competitive *Fagus sylvatica* and *Quercus petraea* trees during 4 years differing in soil drought. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(3), 335–346. <https://doi.org/10.1139/cjfr-30-3-335>
- Bakker, W. H., Feringa, W., Gieske, A. S. M., Gorte, B. G. H., Grabmaier, K. A., Hecker, C. A., ... Wolda, T. (2009). *Principles of Remote Sensing*. (K. Tepmpfli, N. Kerle, G. C. Huurneman, & L. L. F. Jansesn, Ed.). The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Získáno z http://www.itc.nl/library/papers_2009/general/principlesremotesensing.pdf
- Bontemps, S., Arias, M., Cara, C., Dedieu, G., Guzzonato, E., Hagolle, O., ... Koetz, B. (2015). Sentinel-2 for agriculture; Supporting global agriculture monitoring. In *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 4185–4188). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326748>
- Clevers, J. G. P. W., & Gitelson, A. A. (2013). Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 344–351. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.008>
- Clevers, J. G. P. W., Kooistra, L., & van den Brande, M. M. M. (2017). Using Sentinel-2 data for retrieving LAI and leaf and canopy chlorophyll content of a potato crop. *Remote Sensing*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/rs9050405>
- Clevers, de Jong, S. M., Epema, G. F., van der Meer, F., Bakker, W. H., Skidmore, A. K., & Addink, E. A. (2000). MERIS and the red-edge position. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3(4), 313–320. [https://doi.org/10.1016/S0303-2434\(01\)85038-8](https://doi.org/10.1016/S0303-2434(01)85038-8)
- Cocks, T., Jenssen, R., Stewart, A., Wilson, I., & Shields, T. (1998). The HyMap™ airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance. In *1st EARSEL Workshop on Imaging Spectroscopy* (pp. 1–6). Získáno z http://www.neodc.rl.ac.uk/docs/Hymap_specs.pdf
- Curran, P. J., Dungan, J. L., & Gholz, H. L. (1990). Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree Physiology*, 7(1-2-3-4), 33–48. <https://doi.org/10.1093/treephys/7.1-2-3-4.33>
- Dai, K., Li, Z., Tomás, R., Liu, G., Yu, B., Wang, X., ... Stockamp, J. (2016). Monitoring activity at the Daguangbao mega-landslide (China) using Sentinel-1 TOPS time series interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 186, 501–513. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.009>
- Devanathéry, N., Crosetto, M., Cuevas-González, M., Monserrat, O., Barra, A., & Crippa, B. (2016). Deformation Monitoring Using Persistent Scatterer Interferometry and Sentinel-1 SAR Data. *Procedia Computer Science*, 100, 1121–1126. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.263>
- Dimitrovský, K. (2001). *Tvorba nové krajiny na Sokolovsku*. Sokolovská uhelná.
- Donlon, C., Berruti, B., Buongiorno, A., Ferreira, M.-H., Féménias, P., Frerick, J., ... Sciarra, R. (2012). The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 37–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.024>
- Dotzler, S., Hill, J., Buddenbaum, H., & Stoffels, J. (2015). The potential of EnMAP and sentinel-2 data for detecting drought stress phenomena in deciduous forest communities. *Remote Sensing*, 7(10), 14227–14258. <https://doi.org/10.3390/rs71014227>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>

- Fernández-Manso, A., Fernández-Manso, O., & Quintano, C. (2016). SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 50, 170–175. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.03.005>
- Gattuso, J.-P., Hoegh-Guldberg, O., & Pörtner, H.-O. (2014). Cross-Chapter Boxes. In C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, & M. D. Mastrandrea (Ed.), *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability* (pp. 97–99). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379.005>
- Gernez, P., Doxaran, D., & Barillé, L. (2017). Shellfish Aquaculture from Space: Potential of Sentinel2 to Monitor Tide-Driven Changes in Turbidity, Chlorophyll Concentration and Oyster Physiological Response at the Scale of an Oyster Farm. *Frontiers in Marine Science*, 4(May), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00137>
- Hedley, J., Roelfsema, C., Koetz, B., & Phinn, S. (2012). Capability of the Sentinel 2 mission for tropical coral reef mapping and coral bleaching detection. *Remote Sensing of Environment*, 120, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.06.028>
- Hrajnohová Gillarová, H., Pecharová, E., & Kažmierski, T. (2010). Studie Medard z hlediska posuzování vlivů na životní prostředí, 45–48. Získáno z http://147.213.211.222/sites/default/files/2010_1_045_048_hrajnohova.pdf
- Hughes, T. P., Rodrigues, M. J., Bellwood, D. R., Ceccarelli, D., Hoegh-Guldberg, O., McCook, L., ... Willis, B. (2007). Phase Shifts, Herbivory, and the Resilience of Coral Reefs to Climate Change. *Current Biology*, 17(4), 360–365. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.12.049>
- James B. Campbell. (2002). *Introduction to Remote Sensing, Third Edition* (3. vyd.). CRC Press.
- Jutz, S., & Milagro-Pérez, M. P. (2017). Copernicus Program. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10317-3>
- Kopačková, V., Gholizadeh, A., Mišurec, J., Mielke, C., & Rogass, C. (2016). Assessment of red-edge position extraction techniques: A case study for norway spruce forests using himap and simulated sentinel-2 data. *Forests*, 7(10). <https://doi.org/10.3390/f7100226>
- Kopačková, V., Mišurec, J., Lhotáková, Z., Oulehle, F., & Albrechtová, J. (2014). Using multi-date high spectral resolution data to assess the physiological status of macroscopically undamaged foliage on a regional scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 27(PARTB), 169–186. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.09.009>
- Koubek, P., & Poláčková, V. (2005). Jezero Medard, 64. Získáno z http://webmap.kr-karlovarsky.cz/download/vuc/US_Zapadni_casti_Sokolovske_panve_MEDARD/Texty/Medard.pdf
- Kudryavtsev, Vladimir; Yurovskaya, Maria; Chapron, Bertrand; Collard, Fabrice; Donlon, C. (2017). Sun glitter imagery of ocean surface waves. Part 1: Directional spectrum retrieval and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, (1), 2017–2033. <https://doi.org/10.1002/2013JC009262>. Received
- Kudryavtsev, V., Yurovskaya, M., Chapron, B., Collard, F., & Donlon, C. (2017). Sun glitter imagery of surface waves. Part 2: Waves transformation on ocean currents. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(2), 1384–1399. <https://doi.org/10.1002/2016JC012426>
- Lukas, V., Ryant, P., Neudert, L., Dryšlová, T., Gnip, P., & Smutný, V. (2012). *Stanovení a optimalizace diferencovaných dávek dusíkatých hnojiv v precizním zemědělství : metodika pro praxi*. Brno: Mendelova univerzita v Brně.
- Moss, R. A., & Loomis, W. E. (1952). Absorption Spectra of Leaves. I. The Visible Spectrum. *Plant physiology*, 27(2), 370–391. Získáno z <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16654461>
- Navarro, G., Caballero, I., Silva, G., Parra, P.-C., Vázquez, Á., & Caldeira, R. (2017). Evaluation of forest fire on Madeira Island using Sentinel-2A MSI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 58, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.02.003>
- Potin, P., Rosich, B., Miranda, N., & Grimont, P. (2016). Sentinel-1 Mission Status. In *Procedia Computer Science*

- (Roč. 100, s. 1297–1304). <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.245>
- Potin, P., Rosich, B., Roeder, J., & Bargellini, P. (2014). Sentinel-1 Mission operations concept. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 1465–1468). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946713>
- Radoux, J., Chomé, G., Jacques, D. C., Waldner, F., Bellemans, N., Matton, N., ... Defourny, P. (2016). Sentinel-2's potential for sub-pixel landscape feature detection. *Remote Sensing*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/rs8060488>
- Rascher, U., Nichol, C. J., Small, C., & Hendricks, L. (2007). Monitoring spatio-temporal dynamics of photosynthesis with a portable hyperspectral imaging system. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(1), 45–56. <https://doi.org/10.14358/PERS.73.1.45>
- Rennenberg, H., Loreto, F., Polle, A., Brilli, F., Fares, S., Beniwal, R. S., & Gessler, A. (2006). Physiological responses of forest trees to heat and drought. *Plant Biology*. <https://doi.org/10.1055/s-2006-924084>
- Richter, K., Hank, T. B., Vuolo, F., Mauser, W., & D'Urso, G. (2012). Optimal exploitation of the sentinel-2 spectral capabilities for crop leaf area index mapping. *Remote Sensing*, 4(3), 561–582. <https://doi.org/10.3390/rs4030561>
- Rojík, P. (2015). *Geologie a nerostné zdroje Karlovarského kraje*. Karlovy Vary.
- Salama, M. S., Radwan, M., & van der Velde, R. (2012). A hydro-optical model for deriving water quality variables from satellite images (HydroSat): A case study of the Nile River demonstrating the future Sentinel-2 capabilities. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 50–52, 224–232. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2012.08.013>
- Sims, D. A., & Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Smith, R. (2012). Tutorial: Introduction to Hyperspectral Imaging. Získáno z <http://www.microimages.com/documentation/Tutorials/hyprspec.pdf>
- Tondi, E. (2000). Geological analysis and seismic hazard in the Central Apennines (Italy). *Journal of Geodynamics*, 29(3–5), 517–533. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(99\)00048-4](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(99)00048-4)
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., ... Rostan, F. (2012). GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- Traganos, D., & Reinartz, P. (2017). Mapping Mediterranean seagrasses with Sentinel-2 imagery. *Marine Pollution Bulletin*. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.075>
- Van der Meer, F. D., van der Werff, H. M. A., & van Ruitenbeek, F. J. A. (2014). Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote Sensing of Environment*, 148, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.022>
- van der Werff, H., & van der Meer, F. (2015). Sentinel-2 for mapping iron absorption feature parameters. *Remote Sensing*, 7(10), 12635–12653. <https://doi.org/10.3390/rs71012635>
- Veloso, A., Mermoz, S., Bouvet, A., Le Toan, T., Planells, M., Dejoux, J.-F., & Ceschia, E. (2017). Understanding the temporal behavior of crops using Sentinel-1 and Sentinel-2-like data for agricultural applications. *Remote Sensing of Environment*, 199, 415–426. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.015>
- Wooster, M. J., Xu, W., & Nightingale, T. (2012). Sentinel-3 SLSTR active fire detection and FRP product: Pre-launch algorithm development and performance evaluation using MODIS and ASTER datasets. *Remote Sensing of Environment*, 120, 236–254. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.033>
- Xiaofeng, L. (2017). *Hurricane Monitoring With Spaceborne Synthetic Aperture Radar*. Singapore: Springer Verlag, Singapore.
- Yamano, H., & Tamura, M. (2004). Detection limits of coral reef bleaching by satellite remote sensing: Simulation

and data analysis. *Remote Sensing of Environment*, 90(1), 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.005>

Zemek, F. (2014). *Letecký dálkový průzkum Země: teorie a příklady hodnocení terestrických ekosystémů*.

2.10 Internetové zdroje

- Esa. Sentinel Playground | Sentinel Hub. Získáno 11. srpen 2017, z http://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/?lat=40.4&lng=-3.730000000000018&zoom=12&preset=1_NATURAL_COLOR&layers=B04,B03,B02&maxcc=20&gain=1&gamma=1&time=2015-01-01%7C2017-08-11&cloudCorrection=none&atmFilter=&showDates=false&evalscript=
- ESA. Agriculture monitoring. Získáno 11. srpen 2017, z <http://www.sentinel-hub.com/use-cases>
- ESA. Copernicus / Observing the Earth / Our Activities / ESA. Získáno 11. srpen 2017, z http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus
- ESA. Geographical Coverage - Sentinel-4 - Sentinel Online. Získáno 11. srpen 2017, z <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-4/satellite-description/geographical-coverage>
- ESA. Sentinel-2 captures coral bleaching / 05 / 2017 / Images / ESA Multimedia / ESA Online Videos. Získáno 11. srpen 2017, z http://m.esa.int/spaceinimages/Images/2017/05/Sentinel-2_captures_coral_bleaching
- ESA. SENTINEL-3 SLSTR Introduction. Získáno 11. srpen 2017, z <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides>
- ESA. Sentinel-5 - Missions - Sentinel Online. Získáno 11. srpen 2017, z <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-5>
- ESA. SENTINEL-5P ON ROCKOT SENTINEL-5P ON ROCKOT ESA Copernicus Atmosphere Monitoring Mission from Plesetsk. Získáno z http://www.eurockot.com/wp-content/uploads/2014/09/Eurockot_Datenblatt_Sentinel5P_internet_140909.pdf
- ESA. User Guides - Sentinel-3 OLCI - Sentinel Online. Získáno 11. srpen 2017, z <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-olci>
- ESA. (2015). Canada breaks the ice with Sentinel-1 data / Observing the Earth / Our Activities / ESA mobile. Získáno 11. srpen 2017, z http://m.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Canada_breaks_the_ice_with_Sentinel-1_data
- ESA. (2016). SENTINEL-1 PROVIDES NEW INSIGHT INTO ITALY'S EARTHQUAKE. Získáno 8. leden 2016, z http://m.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Sentinel-1_provides_new_insight_into_Italy_s_earthquake

2.11 Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 - Mapa - zemětřesení 24.8. 2016, Itálie	12
Obrázek 2 - Model terénu znázorňující rozsah sesuvu půd cm/rok, Čína	13
Obrázek 3 - Monitorování ledů Canadian Ice Service - Sentinel-1	14
Obrázek 4 - Porovnání změn stavu vegetace - snímky map NDVI Sentinel-2	17
Obrázek 5 - Srovnání map REP HyMap z hyperspektrálních dat a simulovaných dat Sentinel-2.....	19
Obrázek 6 - Porovnání zdravotního stavu listnatých porostů různých systémů – Donnersberg	20
Obrázek 7 - Mapy NDVI Sentinel-2, mapa (vlevo) Madeira 7.8. 2016 před požárem, mapa (vpravo) Maderia 17.8. 2016 po požáru.....	21
Obrázek 8 - Mapy s vegetační indexem s využitím Bands 11, 8A a 22 Sentinel-2, mapa (vlevo) Madeira 7.8. 2016 před požárem, mapa (vpravo) Madeira 17.8. 2016 po požáru	21

Obrázek 9 - Mapy NDVI ze Sentinel-2, mapa (vlevo) Portugalsko 14.6. 2017 před požárem, mapa (vpravo) Portugalsko 4.7. 2017 po požáru.....	22
Obrázek 10 - Mapy s vegetačním indexem s využitím Bands 11, 8A a 22 Sentinel-2, mapa (vlevo) Portugalsko 14.6. 2017 před požárem, mapa (vpravo) Portugalsko 4.7. 2017 po požáru	22
Obrázek 11 - Znečištění řek Taguig a Pasig ústící do Laguna de Bay – snímek Sentinel-2A, 8. května 2016 –	23
Obrázek 12 - Sentinel-2 blednutí korálů - obrázek pořízen Copernicus Sentinel-2 (2016–2017)	24
Obrázek 13 - Mořské víry a odlesky mořské hladiny – snímek pořízen ze Sentinel-2A v blízkosti západní Austrálie 2016.....	25
Obrázek 14 - Oblast pokrytí Sentinel-4 (červená a modrá	30
Obrázek 15 - Porovnání funkčního období GOME (ERS-2), SCIAMACHY (Envisat) a budoucích družic, Sentinel-5P, ..	31
Obrázek 16 - Spektrální křivka odrazivosti zdravé vegetace, obrázek byl volně přepracován.....	34
Obrázek 17 - Spektrální reflektanční křivka – porovnání odrazivosti vegetace, suché a vlhké půdy,	35
Obrázek 18 - Spektrální křivka vegetace - oblast red-edge, obrázek byl volně přepracován	36
Obrázek 19 - Závislost reflektance listů v závislosti na dostupnosti živin	36
Obrázek 20 - Vliv koncentrace chlorofylu na REP pro různé hodnoty LAI standardních plodin	37
Obrázek 21 - Vliv odrazivosti půdy na REP pro různé hodnoty LAI standardních plodin	37
Obrázek 22 - Snímek ze zájmové oblasti u jezera Medard, (5.8.2017)	38
Obrázek 23 - Mapa ve viditelném spektru ze Sentinel-2, pohled na jezero Medard a blízké okolí 27.5. 2017	40
Obrázek 24 - Mapa REP pořízená ze Sentinel-2 - pohled na jezero Medard a jeho okolí 27.5. 2017	41
Obrázek 25 - Letecký snímek zájmové oblasti Medard 24.6. 2016.....	45
Obrázek 26 - Mapa REP ze Sentinelu-2 27.5. 2017 zájmové oblasti Medard s vyznačenými dokumentovanými oblastmi A-E	45
Obrázek 27 - Foto Půdní pokryv (vlevo) - oblast A – Medard, (vpravo) - oblast E – Medard, (5.8.2017)	46
Obrázek 28 - Uhynulé sazenice smrků - oblast A – Medard, (5.8.2017)	46
Obrázek 29 - Vymleté stružky (vlevo) oblast D - Medard, (vpravo) oblast B – Medard (5.8.2017)	47
Tabulka 1 - MSI Spektrální pásma Sentinel-2	16
Tabulka 2 - Sentinel-3 OLCI - 21 spektrálních pásem. Pásma označena modrou.....	27
Tabulka 3 - Sentinel-3 SLSTR - 11 spektrálních pásem	29
Tabulka 4 - Typy rekultivací – Medard (Dimitrovský, 2001).....	39
Tabulka 5 - Naměřené hodnoty reflektancí ze simulovaných dat z map 2010 a reálných dat z map 2017	42
Tabulka 6 - Rozdělení 5 tříd podle zdravotního stavu smrků dle reflektance - HyMap	44

2.12 Přílohy

Oblast č.	1	2	3	4
N	50.195186	50.195177	50.195007	50.194998
E	12.769306	12.769586	12.769292	12.769571

Oblast č.	5	6	7	8
N	50.193714	50.193705	50.193535	50.193526
E	12.770311	12.770591	12.770297	12.770577

Oblast č.	9	10	11	12
N	50.150130	50.150121	50.149950	50.149941
E	12.698827	12.699106	12.698813	12.699092

Oblast č.	13	14	15	16
N	50.143035	50.143026	50.142855	50.142847
E	12.655859	12.656138	12.655845	12.656124

Oblast č.	17	18	19	20
N	50.219775	50.219766	50.219596	50.219587
E	12.583903	12.584183	12.583890	12.584170

Oblast č.	21	22	23	24
N	50.223130	50.223122	50.222942	50.223301
E	12.568449	12.568729	12.568715	12.568742

Oblast č.	25	26	27	28
N	50.266353	50.266126	50.266335	50.266165
E	12.636810	12.637090	12.637370	12.637076

Oblast č.	29	30	31	32
N	50.260292	50.260284	50.260113	50.260580
E	12.646452	12.646732	12.646439	12.640159

Oblast č.	33	34	35	36
N	50.266135	50.266126	50.2659560	50.265947
E	12.706273	12.706553	12.706259	12.706539

Oblast č.	37	38	39	40
N	50.267342	50.267333	50.267162	50.267153
E	12.702296	12.702576	12.702282	12.702562

Příloha č.1: Souřadnice ve formátu DD.ddddd* oblastí určených k validaci hodnot reflektance map 2010 a 2017
Zdroj: Hernová, Jana